LA SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

MAXWELL

Magnetismo de alto voltaje



NATIONAL GEOGRAPHIC

JAMES CLERK MAXWELL fue una de las mentes más brillantes del siglo XIX, y sus aportaciones sentaron las bases de dos grandes revoluciones científicas de la centuria siguiente: la relatividad y la teoría cuántica. Aunó electricidad y magnetismo mediante una corta serie de elegantes ecuaciones que constituyen una de las auténticas cimas de la física de todos los tiempos, a la altura de los logros de Galileo, Newton o Einstein. A pesar de lo revolucionario de sus ideas, Maxwell, hombre muy religioso, siempre consideró que el conocimiento científico debía tener ciertos límites; límites que, paradójicamente, hizo más que nadie por traspasar.

LA SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

MAXWELL

Magnetismo de alto voltaje

NATIONAL GEOGRAPHIC

MIGUEL ÁNGEL SABADELL es físico y divulgador. Es editor técnico de revistas de divulgación científica y ha asesorado a organismos tales como la Expo 2008, el Centro de Astrobiología (INTA-CSIC), vinculado a la NASA, y la European Space Agency (ESA).

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 36, 43a, 62, 66, 74, 77, 79a, 79b, 98, 115ai, 115ad, 115bi, 115bd, 119, 127, 143a, 147, 154, 164, 165; Getty Images: 93, 143bi, 143bd; Immanuel Giel: 39; James Clerk Maxwell Foundation: 25ai, 25b; NASA: 95; National Portrait Gallery: 43bd; Scottish National Portrait Gallery: 25ad; Kim Traynor: 43bi; Universidad de Glasgow: 28.

ISBN: 978-84-473-7650-6
Depósito legal: B-9891-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

Cuando en la segunda mitad del siglo XVIII Lavoisier presentó una lista de los elementos que componían el mundo, los dividió en cuatro grupos. Por un lado estaban los metales, como el plomo o el hierro —de los que identificó 17—; por otro, las «tierras»: silicio, magnesio, calcio y aluminio; también estaba el grupo de aquellos elementos que por oxidación producen ácidos, como el azufre, el fósforo y el carbono; y finalmente el grupo del oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno, junto con dos sustancias sin peso, los imponderables: la luz y el calórico. A ambos habría que añadir también el éter, fluido sutil que llenaba el espacio y permitía a la luz viajar por él, y los fluidos eléctrico y magnético. Los cinco se mantendrían como sustancias enigmáticas, ambiguas e inaccesibles hasta bien entrado el siglo XIX. «Son los imponderables, el calor, la electricidad y el amor, quienes gobiernan el mundo», escribiría en 1858 el médico y fino humorista americano Oliver Wendell Holmes.

A mediados del siglo XIX, todo eso cambió. El calórico, la sustancia que se suponía era la responsable de que los objetos se calentaran, desapareció de los libros de física gracias al esfuerzo de numerosos científicos: Benjamin Thompson, James Joule, William Thomson, Hermann von Helmholtz... Pero la desaparición de las sustancias eléctrica y magnética se debe, ante todo, al trabajo de una única persona, James Clerk Maxwell. Es cierto que Maxwell

se sostuvo en hombros de gigantes como el gran Michael Faraday, pero la revolución conceptual a la que nos condujo y que abrió las puertas a la física del siglo XX fue un logro exclusivamente suyo. No en vano Albert Einstein escribió: «Una época científica terminó y otra comenzó con James Clerk Maxwell».

Su teoría electromagnética, resumida en las cuatro famosas leyes de Maxwell, se mantiene como uno de los pilares de nuestro conocimiento del universo. De hecho, la teoría de la relatividad surge en parte por la imposibilidad de reconciliar la teoría electromagnética de Maxwell con la mecánica de Newton. Había que escoger entre una u otra, y Einstein optó por contradecir a Newton. Y no solo eso, sino que la teoría electromagnética que formuló en *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873) ha resistido los profundos cambios y revoluciones que sufrió la física durante el siglo XX. Hasta ese punto es una pieza fundamental en nuestra comprensión del mundo que nos rodea, desde las escalas más pequeñas, el mundo de los átomos, hasta el más grande, el de los cúmulos de galaxias. Sus ideas eran tan diferentes a lo que se había hecho hasta entonces que sus contemporáneos no sabían qué hacer con ellas; la mayoría de los científicos estaban desconcertados e incluso sus amigos más fieles creían que se estaba recreando en una fantasía. No era para menos: les estaba diciendo que el espacio que rodeaba a las cargas eléctricas y los imanes no estaba vacío, sino que contenía «algo» que le aportaba nuevas propiedades y cuyo efecto visible era la existencia de fuerzas eléctricas y magnéticas. Aún más, que cada vez que un imán vibraba o cambiaba una corriente eléctrica, se generaba una onda que se esparcía por el espacio del mismo modo que lo hacían las olas en un estanque tras arrojar una piedra. Y lo más asombroso de todo: esa onda era la luz. De este modo, de un plumazo, Maxwell unía bajo una misma formulación la electricidad, el magnetismo y la luz. No es extraño que ante semejante despliegue conceptual sus colegas guardaran silencio. Únicamente en 1888, casi una década después de su muerte, su teoría electromagnética de la luz, tal como él la bautizó en 1864, fue aceptada. Y todo gracias a que uno de los mejores físicos alemanes de entonces, Hermann von Helmholtz, propuso a la Academia de Ciencias de Berlín que

ofreciera un premio a quien demostrara experimentalmente que la teoría de Maxwell era correcta. Hoy, su enfoque del problema del electromagnetismo se ha convertido en la manera en que los físicos estudian el resto de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, y junto con su trabajo sobre la cinética de los gases abrió las puertas a las dos grandes revoluciones científicas del siglo XX: la relatividad y la teoría cuántica.

Solo esto bastaría para que su nombre apareciera con brillantes luces de neón en la historia de la ciencia. Sin embargo, Maxwell hizo mucho más. Fue el primero en establecer una teoría cuantitativa del color y explicó cómo se podía generar cualquier luz de cualquier color a partir de tres primarios —el rojo, el verde y el azul—, cosa que comprobamos todos los días al encender la televisión; hizo la primera fotografía en color de la historia; demostró que los anillos de Saturno están formados por miríadas de aerolitos; introdujo los métodos estadísticos en la física creando toda una nueva disciplina que recibe el nombre de, a la sazón, física estadística, que se ocupa del estudio de la materia; puso las bases de la teoría cinética de los gases, que explica el comportamiento de un gas a partir del movimiento de las moléculas que lo componen, y relacionó la velocidad y la energía que transporta cada partícula con sus propiedades macroscópicas, como la temperatura o la presión; y también colaboró en el diseño y fue el primer director del laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, el centro que, en la actualidad, atesora el mayor número de premios Nobel. Por todo ello, Maxwell es merecedor de subir al podio de la física junto con Newton y Einstein, aunque muy pocas personas conozcan su nombre y su hazaña intelectual.

Sorprendentemente, una de las mentes más perspicaces del siglo XIX no recibió el reconocimiento que merecía en su propio país. Nadie es profeta en su tierra. Solo le fueron concedidos dos galardones en su vida: la medalla Rumford de la Royal Society de Londres y la Keith de la Royal Society de Edimburgo. Y el trabajo por el que se le reconoció el mérito fue por el realizado sobre la visión de los colores. Este olvido se ha mantenido en el tiempo. Cuando la Royal Society de Londres celebró en 1960 el tricentenario de su creación, la reina Isabel asistió y en su discurso alabó el

trabajo de un buen número de sus miembros, y podemos suponer que la lista le fue proporcionada por la propia sociedad: Maxwell no estuvo entre los mencionados.

James Clerk Maxwell creía en el progreso científico, la «aproximación a la verdad», como expresó en su lección inaugural en Cambridge al hacerse cargo del laboratorio Cavendish. Aunque su marcado sentido del deber le obligaba a aceptar las responsabilidades de los cargos que detentó a lo largo de su vida, su verdadero compromiso lo tuvo con lo que siempre fue sin decirlo, un filósofo natural, un indagador emocionado con descubrir el funcionamiento de la naturaleza. Como escribió su amigo y biógrafo Lewis Campbell, «con sagrada devoción continuó en su madurez lo que había sido su disfrute en la niñez». Su visión de los valores culturales de la ciencia estaba muy alejada de la corriente de laicismo que comenzó a soplar a mediados del siglo XIX, sobre todo después de la publicación de *El origen de las especies* de Charles Darwin. Profundamente religioso, pero en ningún momento dogmático o fundamentalista, señalaba que los valores morales y religiosos eran más importantes que los beneficios del progreso material. Asociaba el estudio de la ciencia con el crecimiento como persona, y avisaba del peligro que representaba creer que solo con la ciencia se podía llegar a algún tipo de iluminación intelectual. Para él había límites al conocimiento y rechazaba la arrogancia de creer que podíamos acercarnos todo lo que quisiéramos a «la presciencia Divina»: sin duda, para Maxwell había límites para el conocimiento científico. Irónicamente, su trabajo demostró que basta una mente libre de prejuicios para superar unos límites que nosotros mismos nos imponemos.

1831 Nace en Edimburgo, Escocia, el 13 de junio, James Clerk Maxwell, único hijo de John Clerk y Frances Cay, pero pronto se traslada a la casa solariega de Glenlair.

1841 Comienza a estudiar en la Academia de Edimburgo.

1846 Publica su primer artículo científico, sobre los óvalos.

1847 Se matricula en la Universidad de Edimburgo para estudiar matemáticas.

1848 Publica el artículo «The Theory of Rolling Curves».

1850 Presenta «On the Equilibrium of Elastic Solids», y se traslada a la Universidad de Cambridge.

1854 Acaba sus estudios en Cambridge: obtiene la segunda mejor nota en el examen de licenciatura.

1855 Publica «Experiments on Colour, As Perceived by the Eye» y la primera parte de «On the Faraday's Lines of Force». La segunda parte aparece al año siguiente.

1856 Muere su padre. Es nombrado profesor de Filosofía Natural en el Marischal College de Aberdeen.

1858 Gana el premio Adams por su estudio de los anillos de Saturno. Se casa con Katherine Mary Dewar.

1860 Publica los artículos «Illustrations of the Dynamical Theory of Gases» y «On the Theory of Compound Colours and Relations of the Colours of the Spectrum». Es nombrado profesor de Filosofía Natural en el King's College de Londres. Recibe la medalla Rumford de la Royal Society de Londres. Contrae la viruela.

1861 Hace la primera fotografía en color. Publica la primera parte de «On Physical Lines of Force». La segunda aparece al año siguiente.

1865 Dimite de su plaza en el King's College. Regresa a Glenlair. Publica «On Reciprocal Figures and Diagrams of Force» y «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field».

1866 Publica «On the Viscosity or Internal Friction of Air and Other Gases».

1867 Presenta el artículo «Illustrations on the Dynamical Theory of Gases». Visita Italia.

1871 Publica el libro *The Theory of Heat*. Es nombrado profesor de Física Experimental en la Universidad de Cambridge.

1873 Ve la luz su obra *A Treatise on Electricity and Magnetism*.

1879 Publica el libro *Electrical Researches of the Honourable Henry Canvendish*. Muere el 5 de noviembre, como consecuencia de un cáncer abdominal.

CAPÍTULO 1

Un matemático precoz

Unos padres de clase alta que le querían y le apoyaban, una familia con interés por la ciencia y la tecnología, y un cerebro que empezaba a dar muestra de lo que estaba por venir resume la infancia y la adolescencia de Maxwell, un joven escocés que iba a revolucionar la forma de entender la física.

El primer día de clase regresó a casa con la ropa hecha jirones. Sus compañeros le habían tratado sin clemencia alguna. El novato de diez años que empezaba en la Academia de Edimburgo en segundo curso había llegado vestido con una peculiar túnica de *tweed* con cuello de volantes y unos zapatos cuadrados con hebillas de latón. Jamás habían visto nada parecido y, con la crueldad típica de los infantes, arremetieron contra él sin piedad. Pullas llenas de escarnio y menosprecio volaron contra él mientras el pobre novato se defendía con un acento de Galloway, una región al suroeste de Escocia tradicionalmente famosa por sus caballos y la cría de ganado, lo que provocaba gritos de victoria entre sus condiscípulos. Tenía toda la pinta de ser el tonto de la clase y le pusieron el mote de «Dafty». El maltrato continuó mientras el pobre novato lo soportaba con estoicismo y una ración amplia de buen humor, hasta que un día estalló. La violencia con la que lo hizo dejó sin habla a sus compañeros, que desde entonces le mostraron más respeto. Pero el apodo se mantuvo.

James Clerk Maxwell descendía de una distinguida familia, los Clerk de Penicuik del condado de Midlothian, al sur de Escocia y a dieciséis kilómetros de Edimburgo. Entre 1707 y 1755, su tatarabuelo, sir John Clerk, fue uno de los barones de Échiquier, la Cámara de Cuentas de Escocia, y un músico de éxito cuyas piezas todavía es posible escucharlas. Su segundo hijo, su bisabuelo

George, se casó con Dorothea Maxwell, la heredera de Middlebie, un villorrio en el condado de Dumfriesshire, al suroeste de Escocia, y añadió el apellido de Maxwell al suyo. Una serie de malas inversiones en minas y fábricas le obligó a vender parte de sus propiedades en Middlebie y lo que quedó las heredó su nieto John, que retuvo el apellido Maxwell. Su hermano mayor, George, heredó Penicuik y el título de baronet.

John estudió abogacía, pero su pasión estaba en la ciencia, sobre todo en sus aplicaciones prácticas. Vivió con su madre viuda en Edimburgo hasta su muerte en 1824. Dos años más tarde se casó con Frances Cay, la hermana de un amigo y compañero de aventuras científicas. Con ella vivió sus primeros años de matrimonio en Edimburgo: la exigua propiedad de Middlebie no tenía una casa donde el terrateniente pudiera vivir. De hecho, nunca la había tenido, pues los dueños habían controlado sus dominios desde la lejanía. Pero, al poco tiempo, compró una propiedad vecina y construyó una mansión que llamó Glenlair, donde se trasladó con su mujer. Durante un tiempo estuvieron viviendo entre Glenlair y Edimburgo, y fue allí, en la vieja casa en la que había vivido con su madre en el número 14 de Indian Street, donde nació su único hijo James el 13 de junio de 1831. Fue un nacimiento tardío, pues Frances tenía cuarenta años cuando dio a luz, y una alegría que hizo olvidar la pérdida de una hija anterior que había fallecido a los pocos años de nacer.

En la década de 1830, Glenlair se encontraba realmente en medio de la campiña escocesa, en el valle del río Urr: llegar desde Edimburgo requería dos días de viaje por unos caminos que no estaban acostumbrados a ver pasar carruajes; lo más, un coche de camino de dos ruedas con capota tirado por un caballo. La propiedad tampoco era muy extensa —unas 600 hectáreas—, pero suficiente para que James disfrutara como nadie. Los primeros ocho años de su vida realmente fueron muy felices. Vivir en medio del campo le dio una libertad que no hubiera disfrutado en la ciudad: subía a los árboles, se peleaba con los demás niños de la zona, exploraba los campos y los bosques y observaba con dedicación a los animales, especialmente los pájaros. Pronto todos se acostumbraron a ver aparecer de repente al pequeño James pidiendo explicaciones de lo que estaban haciendo en ese momento e insistiendo en hacerlo él.

Sus padres le adoraban. Al poco de ponerse en pie y empezar a hablar, se dieron cuenta de que su hijo no solo se interesaba por cualquier cosa, algo habitual en los niños, sino que iba siempre un poco más allá en sus pesquisas infantiles sobre el funcionamiento del mundo. Por ejemplo, no se contentó con descubrir cómo llamar a los timbres con los que se avisaba al servicio en la cocina, sino que se empeñó en conocer qué llamador hacía sonar qué campanilla y por dónde corrían los cables por la casa.

«La felicidad y la miseria deben crecer inevitablemente con el crecimiento del poder y del conocimiento ... la traslación de uno a otro lado es esencialmente *milagrosa*, mientras que el progreso es algo natural.»

— James Clerk Maxwell.

Bajo la tutela de su madre aprendió a leer y a escribir. Mujer muy cultivada en las artes y las humanidades, imbuyó a su hijo la pasión por la historia y la geografía, y en especial por la literatura. Antes de que pudiera darse cuenta de lo que hacía, leía todo lo que caía en sus manos y tenía sus autores preferidos, John Milton y William Shakespeare. Es más, tenía una envidiable habilidad: era capaz de recordar la mayoría de lo que leía. Dicen que «amas lo que mamas», y para James la literatura siempre fue una pasión encendida: no en balde una de las distracciones de la familia consistía en reunirse y leer en voz alta novelas, poesía u obras de teatro. También la religión desempeñaba una parte importante en la rutina de la mansión: todos los días patronos y sirvientes se reunían para rezar, y los domingos acudían a la iglesia de Parton, a ocho kilómetros de la casa. Con un padre presbiteriano y una madre episcopaliana, el matrimonio prosperó porque ambos eran tolerantes en temas doctrinales.

Como estipulaban las normas sociales de la época, los Clerk Maxwell participaban en ferias y bailes e intercambiaban visitas con otras familias de su misma posición social en el Valle Feliz, como sus residentes llamaban al valle del Urr. John, que era abogado en Edimburgo, poseía una más que aceptable renta y no le preocupaba lo más mínimo florecer en el negocio de los tribunales.

Su corazón pertenecía a la ciencia y a la tecnología: hizo muchos amigos en la industria, la agricultura y las universidades y le apasionaba mantenerse al corriente de las nuevas ideas científicas.

Su mundo tranquilo y apacible se vio alterado cuando, cerca de la cuarentena, se enamoró de Frances, una mujer resolutiva que le proporcionó ese «levántate y anda» que necesitaba en su vida. Él, que había heredado Middlebie años antes y pensaba instalarse allí, una idea que rondaba en su cabeza pero que no se decidió a llevarla a cabo, se vio impulsado por la efervescencia de su mujer para empezar a levantar primero la casa y luego su vida de familia, en la hacienda.

GLENLAIR

El proyecto fue pergeñado por el propio John mano a mano con Walter Newall, el arquitecto más renombrado de la zona, famoso por sus diseños de granjas, casas de campo (los famosos *cottage* británicos) e iglesias (la de Parton fue creación suya). Curiosamente, los primeros planos de Newall revelaban una construcción de cuatro pisos con torres, chimeneas, tejados con gabletes en escalera... los típicos elementos del estilo noble escocés de la época. Sin embargo, el gusto de John era otro, y en la versión simplificada que siguió se eliminaron todos esos elementos señoriales y quedó reducida a una granja típica de dos pisos del valle de Urr. Los gabletes perdieron sus referencias religiosas —normalmente eran cruces— y se colocaron motivos botánicos y astronómicos, más del interés de John.

En el verano de 1842, John Clerk Maxwell supervisó la construcción de los anexos, incluyendo un colmenar, siguiendo la distribución y estilo que habían dado fama a Newall como arquitecto de granjas y alquerías. También construyó una laguna para patos conectada con el río Urr, donde el joven James pasaría horas y horas observando las aves y el peculiar comportamiento del agua. Imbuido totalmente en el espíritu granjero, John diseñó la ropa de sus trabajadores y de su hijo James, incluyendo los zapatos. De

hecho, el año anterior había leído un artículo sobre aspectos técnicos en la manufactura de zapatos en la Royal Scottish Society of Arts fundada por el físico David Brewster, que hizo innumerables aportaciones a la teoría de la polarización de la luz.

> «En cada rama del conocimiento, el progreso es proporcional a la cantidad de hechos sobre los que se construye, y por lo tanto a la facilidad de obtención de datos.»
>
> — James Clerk Maxwell.

Nada había en Glenlair que recordara el origen ilustre de sus antepasados: ni blasones, ni plata de la familia, ni pasillos llenos de retratos. Lo único que John atesoraba eran unas cuantas gaitas deterioradas que su abuelo había usado cuando, siendo capitán de barco de la British East India Company, naufragó y le sirvieron para mantenerse a flote. La falta de ceremonia habitual en la pequeña nobleza inglesa fue fundamental para el desarrollo personal del joven James: su madre se convirtió en su tutora, su padre le enseñó a llevar el gobierno de una propiedad y ambos le dejaban corretear y jugar con los otros niños de la zona. De ellos adquirió la forma de hablar de Galloway y su acento característico, que nunca le abandonó.

Pero cuando James tenía siete años, a su madre le diagnosticaron un cáncer abdominal. Frances se sometió a una operación quirúrgica, en aquellos tiempos sin anestesia: las posibilidades de éxito eran pocas, pero decidió arriesgarse por poder estar más tiempo con su marido y su hijo. Sin embargo, la probabilidad se cumplió y murió al poco de realizarse tan espantoso tratamiento: tenía cuarenta y siete años.

Frances había sido el faro y guía de la familia, y tras su desaparición, a todos sus habitantes Glenlair les pareció un lugar más frío y desolado. La pérdida unió más a padre e hijo, pero había que realizar algunos cambios. Uno de ellos era adelantar la edad de escolarización de James, que tenían planeada cuando tuviera trece años e ir directamente a la universidad. Pero John no podía ocuparse de la educación de su hijo: mantener la propiedad en pie

le ocupaba demasiado tiempo. Como no había una escuela cercana y no quería enviarlo lejos, pues no soportaría la soledad en la que se encontraría, contrató como tutor para su hijo a un joven de dieciséis años que había obtenido unas notas brillantes en la escuela, pero que había retrasado su ingreso en la universidad: a sus ojos, era el candidato perfecto. La realidad fue otra muy distinta.

Este joven sin ninguna preparación para la enseñanza lo llevaba a cabo tal y como le habían educado, haciendo honor al viejo aforismo de «la letra con sangre entra». James, un niño brillante, quería complacer a su padre, pero no entendía por qué había que memorizar cifras y palabras sin sentido. Ningún tirón de orejas ni coscorrón iban a hacerle cambiar de opinión respecto a esa forma de aprendizaje. Pero, finalmente, después de un año de tormento, se rebeló. Junto a la charca de los patos, James tenía una vieja bañera que usaba como barca. En mitad de la lección, salió corriendo y remó hasta llegar al centro de la charca desafiando los gritos y amenazas de su tutor. Y allí se quedó.

LA ACADEMIA DE EDIMBURGO

La bronca de su padre fue en consonancia con su acto de rebelión, pero al menos logró hacerle reflexionar. Entonces entró en acción su cuñada Jane, la hermana más joven de Frances, que vivía en Edimburgo. Comprendió que un niño de diez años debía ir a la escuela. Con la ayuda de la hermana de John, Isabella Wedderburn, que también vivía en Edimburgo, convencieron al reacio padre de que James necesitaba recibir una educación formal. Además, Isabella vivía cerca de la Academia de Edimburgo, una de las mejores escuelas de Escocia. La elección estaba hecha.

Por desgracia, el primer año ya estaba completo, así que el novato James tuvo que entrar en segundo y enfrentarse con su acento de campo y su peculiar vestimenta, diseñada por su padre, a sesenta niños provenientes de las mejores familias de la ciudad, baleados en los habituales conflictos escolares, de maneras y hablas refinadas, vestidos con chaquetas ajustadas y zapatos estrechos.

Con la ayuda de sus tías Jane e Isabella, James empezó a vestir como sus compañeros pero, para tormento de Jane, no se comportaba como ellos. En raras ocasiones participaba en los deportes en los que se esperaba que compitiera un chico de su posición y, aunque solía jugar en el recreo con los demás, la mayoría de las ocasiones se iba a una esquina del patio donde había unos pocos árboles y algo de hierba y se dedicaba a observar los escarabajos y las abejas, o a inventarse ejercicios gimnásticos que realizaba en las ramas. No obstante, no era la prácticamente inexistente relación con sus compañeros lo que le hacía acudir receloso a clase, sino la repetición sin sentido de ejercicios de griego y latín, que le recordaba la época de su tutor. Pero había algo más que le martirizaba: sus titubeos cuando hablaba en público, que hacía que las palabras se agolparan a rachas entre largos espacios de tiempo en silencio. Este defecto le acompañó durante la mayor parte de su vida. Poco a poco comenzó a dar muestras de su inteligencia; empezó a destacar rápidamente en biografías de las Escrituras y en inglés —claro reflejo de su vida en Glenlair—, mientras que, a causa de la falta de preparación previa, se mantuvo en un discreto segundo plano en aritmética y en latín.

> «[James] tenía tres cualidades que sus compañeros no podían dejar de admirar: agilidad y destreza en sus brazos, coraje imperturbable y una profunda naturaleza bondadosa.»
>
> — Palabras de Lewis Campbell, compañero de Maxwell en la Academia de Edimburgo, y posteriormente su biógrafo.

En casa de su tía Isabella, que vivía en el 31 de la bocacalle de Indian Street Heriot Row —y que entre la familia se la llamaba «Old 31»—, la situación era muy estimulante. James se maravilló con la biblioteca, mucho mejor nutrida que la de Glenlair. Pronto descubrió la obra del escritor irlandés Jonathan Swift y la del gran poeta, dramaturgo y crítico John Dryden, que dominó la vida literaria inglesa durante la segunda mitad del siglo XVII. En el campo de la filosofía, un terreno que también estaría muy presente en su vida, comenzó por los textos de Thomas Hobbes.

El padre de James iba a Edimburgo siempre que podía, y las tardes de los sábados solían pasear por los alrededores de la ciudad. Su pasión por la ciencia y la tecnología estaba presente en casi todas las actividades que compartieron en aquellas tardes festivas, ya fuera visitando la construcción del ferrocarril hacia el puerto de Granton, una de las salidas al mar de Edimburgo, o los estratos geológicos de los riscos de Salisbury Crags, unos cerros junto a los que vivió el padre de la geología moderna James Hutton entre 1768 y 1797. Las observaciones que Hutton hizo de los estratos le permitieron cuestionar la edad de la Tierra basada en cálculos bíblicos y aumentarla a varios millones de años. Padre e hijo también acudían a las diferentes atracciones que animaban la ciudad los fines de semana. Una de ellas fue una muestra de «máquinas electromagnéticas», que visitaron en febrero de 1842. La visión de esos primitivos dispositivos, muy lejos de los motores y generadores que conocemos hoy, despertó el interés de James por un tema con el que marcaría un antes y un después en la física.

La mayor parte de lo que sabemos de la vida de Maxwell de esa época de niñez proviene del intercambio epistolar con su padre, y dichas cartas revelan el cariño que se tenían y el deseo de James de agradar y divertir a su padre en la triste soledad de Glenlair. En ellas encontramos la primera referencia a sus investigaciones en matemáticas, pocos días después de su decimotercer cumpleaños: «he hecho un tetraedro, un dodecaedro y otros dos *edros* cuyo nombre no conozco». Las clases de geometría no habían empezado y es muy probable que desconociera que solo existen cinco sólidos regulares, pero no se puede negar, como comenta su compañero y biógrafo Lewis Campbell en *La vida de James Clerk Maxwell*, que «se veía atraído por estos tipos [de sólidos] de total simetría, y su imaginación le llevó a construirlos con sus propias manos».

A pesar de lo poco que le gustaba el método de enseñanza, y de que su tutor, el señor Carmichael, era muy aficionado a usar lo que era conocido como el *tawse* —una tira de cuero terminada en varias colas que los profesores usaban a discreción sobre las palmas de sus alumnos—, poco a poco James fue progresando en la clase. De estar sentado en los últimos pupitres subió al puesto

decimonoveno. Su posición en la clase mejoró sensiblemente al darse cuenta de que merecía la pena aprender griego y latín. Su conocimiento de la Biblia era tal que en su segundo año ganó el premio que se entregaba al mejor estudiante.

Fue en el tercer año cuando James empezó a revelar todo su potencial. Gracias a su buen rendimiento los dos años anteriores, en octubre de 1844 fue promocionado a la clase del rector de la academia, John Williams. Por un golpe de suerte, uno de sus compañeros, Lewis Campbell, se había mudado a una casa vecina de la de su tía Isabella. Lewis era la estrella rutilante de la clase y James mantenía con él una amistosa rivalidad por ocupar los primeros puestos. Tras la mudanza se convirtió en una gran amistad que iba a perdurar toda la vida. Por fin, James había encontrado a alguien de su edad con quien hablar de los temas que le interesaban. Y uno de sus temas en común era la geometría.

La amistad con Lewis puso fin a su aislamiento en la escuela y en poco tiempo se encontró formando parte de un grupo de estudiantes de mentes inquietas entre los que se encontraba quien también acabaría siendo un amigo para toda la vida, Peter Guthrie Tait.

Como era habitual, las vacaciones de ese verano las pasó con su padre en Glenlair. Allí se dedicó a montar a caballo, caminar por los prados y colinas, tirar al arco, hacer comidas en el campo, ayudar a su padre en los negocios de la granja y a los empleados en la cosecha... Lo único que nunca le gustó fue ir de caza: no la condenaba, pero jamás participó en las cacerías; sentía un enorme cariño por todos los animales. Y a su regreso para el nuevo curso, con catorce años, empezó a asistir a las reuniones de la Royal Society de Edimburgo.

ÓVALOS

El primer interés científico de James Clerk Maxwell fue matemático: desarrollar un método para dibujar óvalos usando alfileres, hilos y un lápiz. Todos sabemos que para dibujar un círculo basta

con atar un hilo a un alfiler, y en el otro extremo un lápiz. Si utilizamos dos alfileres unidos por un hilo, empujamos el lápiz hacia arriba y empezamos a hacer trazos manteniendo el hilo tenso en todo momento, dibujaremos una elipse (véase la figura). Los lugares donde se encuentran los alfileres reciben el nombre de focos de la elipse.

Si acercamos los dos alfileres, la curva dibujada se parecerá cada vez más a una circunferencia, una figura que aparece cuando ambos alfileres se encuentran en el mismo lugar. Si los separamos, la forma ovalada se va haciendo cada vez más pronunciada. Maxwell siguió explorando la manera de dibujar curvas con dos focos con alfileres, cordel y lápiz. Este divertimento matemático derivó en su primer artículo científico, que completó cuando aún no había cumplido los quince años. Al verlo, su padre decidió enviarlo a su amigo James D. Forbes, profesor de Filosofía Natural en la Universidad de Edimburgo. El artículo le llamó suficientemente la atención como para comentárselo a su colega matemático Philip Kelland y ambos buscaron en la biblioteca de la universidad si alguien había hecho algo similar antes. Y lo encontraron: René Descartes. La sorpresa que se llevaron fue mayúscula: el filósofo, físico y matemático francés había estudiado las curvas bifocales, pero el método de dibujo del joven James era más sencillo, y sus resultados, más generales. James había deducido que podía generar toda una familia de óvalos con la siguiente ecuación: $m \cdot p + n \cdot q = s$, donde m y n son dos números enteros cualesquiera, p y q las distancias del lápiz a los alfileres (la distancia focal) y s la longitud del cordel. En el caso de $m = n = 1$, lo que se obtiene es la ecuación de una elipse. Maxwell no podía saberlo, pero en años posteriores su descubrimiento tuvo una gran influencia en el campo de la óptica y en el diseño de lentes.

Una manera de dibujar una elipse es usando un cordel unido a dos alfileres y un lápiz.

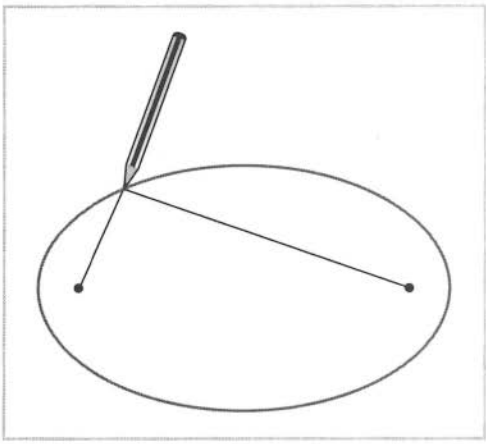








FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Maxwell cuando tenía alrededor de doce años.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Peter Guthrie Tait, físico escocés pionero en termodinámica, compañero de Maxwell en la Academia de Edimburgo. Desde aquella época, ambos forjaron una profunda amistad.

FOTO INFERIOR:
Imagen de Glenlair tomada antes de que un tremendo fuego destruyera gran parte de la casa en 1929. En ella vivió Maxwell desde 1832 hasta su muerte, en 1879.

Forbes escribió al padre de James:

> Su opinión [de Kelland] coincide con la mía de que el artículo de su hijo es de lo más ingenioso y meritorio y creemos que es una nueva manera de considerar curvas con referencia a sus focos. [...] Si lo desea, creo que la simplicidad y elegancia del método le da derecho a presentarlo ante la Royal Society.

De este modo, el primer artículo científico de James Clerk Maxwell, «On the Description of Oval Curves and Those Having a Plurality of Foci», fue leído ante los miembros de la Royal Society de Edimburgo el 6 de abril de 1846 por el propio Forbes, pues se consideró que James era demasiado joven para hacerlo. Su padre anotó en su diario que los «óvalos de James fueron recibidos con gran atención y una aprobación general». No podía estar más orgulloso.

UNA MENTE EN PREPARACIÓN

El hallazgo de Forbes permitió a James descubrir el impresionante trabajo matemático de Descartes. Fue entonces cuando tomó una determinación que iba a tener una gran influencia en su carrera: no emprender investigación alguna en ninguna rama de la ciencia sin haber leído antes el trabajo de todos sus pioneros. También encontró un pequeño error en los cálculos del francés y aprendió que hasta los mejores científicos cometen errores. No fue un aprendizaje en balde, pues él mismo era consciente de que solía equivocarse en sus cálculos.

Maxwell fue siempre tolerante con los errores de cálculo de los demás, pero absolutamente intransigente con aquellas faltas de honestidad y de claridad con el lector: en más de una ocasión expresó su profundo disgusto con el físico y matemático Siméon Denis Poisson por «decir mentiras sobre la manera de hacer barómetros» y, sobre todo, con el también físico André-Marie Ampère, porque solo hizo públicos sus mejores experimentos que demos-

traban la fuerza que aparece entre dos hilos conductores cuando transportan corriente eléctrica y ocultó deliberadamente aquellos —más toscos y menos claros— con los cuales había descubierto la ley del electromagnetismo que lleva su nombre.

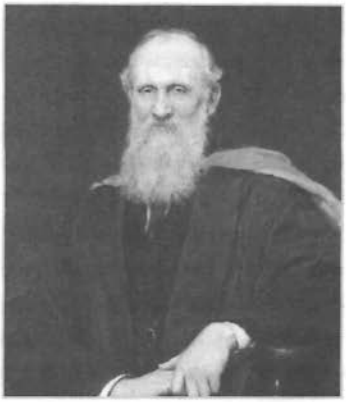
James disfrutó mucho los dos últimos años de escuela, aunque sufrió una serie de enfermedades: a pesar de ser fuerte y atlético, tenía tendencia a enfermar. Sus numerosas lecturas le resultaban tremendamente provechosas porque tenía la envidiable habilidad de recordar prácticamente todo lo que leía. Y cuando no estaba enfrascado entre las páginas de los libros, se dedicaba a componer poemas de todo lo imaginable con la métrica y el ritmo correctos. Cuando acabó su período escolar en 1847, era el primero de la clase en matemáticas e inglés, y había ganado premios en historia, geografía y francés. En el cómputo general, era el segundo de la clase. El claustro de profesores de la academia, queriendo impresionar a los padres de futuros alumnos, añadieron una nueva asignatura al currículo: ciencias físicas. Uno de sus compañeros recordaría tiempo después que Maxwell y Tait sabían más del tema que el profesor...

«Soy totalmente capaz de escribir una fórmula estrambótica.»

— MAXWELL, ACERCA DE SU RECONOCIMIENTO SOBRE LOS ERRORES EN LOS CÁLCULOS.

De vez en cuando, James pasaba alguna temporada con la hermana de su madre, la tía Jane. Ella vio claro cuál debía ser su labor: amortiguar las excentricidades de su sobrino a la vez que enseñarle a desenvolverse en sociedad. Cuando se quedaba encandilado observando los patrones que producía la luz de las velas en la mesa de cristal, ella le recriminaba con un «Jamesie, estás en Babia». La religión también estuvo presente en su vida juvenil; acudía tanto a los servicios episcopalianos como a los presbiterianos y su tía le apuntó a las clases de catecismo de su amigo Dean Ramsey, un buen hombre cuya máxima preocupación era que los jóvenes no acabasen en el redil de los nuevos cultos fundamentalistas que estaban surgiendo, como la presbiteriana Iglesia Libre de Escocia, una escisión de la Iglesia oficial de esta

WILLIAM THOMSON, LORD KELVIN



Retrato de William Thomson por Hubert von Herkomer, conservado en el Museo de Glasgow.

Nacido en Belfast en 1824, con diez años William Thomson ya era alumno en la Universidad de Glasgow. Tenía una más que notable capacidad para extraer aplicaciones técnicas a la ciencia y gracias a ella consiguió amasar una pequeña fortuna que, tras graduarse en la Universidad de Cambridge, dilapidó durante una breve estancia en París. Al poco tiempo de semejante «descalabro» económico le ofrecieron la cátedra de Filosofía Natural en la Universidad de Glasgow. Tenía entonces veintidós años y en ella se mantuvo hasta su fallecimiento, a pesar de las numerosas ofertas que llegó a recibir. Thomson dedicaba su tiempo a dos placenteras tareas: investigar y ganar dinero en cantidades envidiables gracias a sus trabajos en el —en aquellos días— novedoso campo de la telegrafía. La superioridad británica en comunicaciones internacionales y telegrafía submarina se puede atribuir a los trabajos de Thomson sobre los problemas en la transmisión de señales a largas distancias. No contento con eso, patentó un receptor telegráfico que fue escogido, entre otros muchos, como el receptor oficial de todas las oficinas de telégrafos del Imperio británico. Por supuesto, esta elección le reportó pingües beneficios.

Las bases de la termodinámica

Sin embargo, hoy se le recuerda por otra hazaña, mucho más relacionada con su materia gris. Un día escuchó en Oxford la ponencia de un joven científico llamado James Joule en la que exponía sus recientes descubrimientos acerca de la verdadera naturaleza del calor. Thomson no pudo quitarse estas ideas de su cabeza y poco tiempo después publicaba el libro *Sobre la teoría dinámica del calor*. En esta obra defendía que todos los procesos en los que intervenía el calor podían explicarse si existían dos leyes fundamentales. Una la acababa de enunciar Joule: la ley de conservación de la energía. La otra, decía, señala una asimetría fundamental en la naturaleza: el calor fluye espontáneamente del cuerpo caliente al frío. Estas dos leyes son las piezas claves de la termodinámica. William Thomson, que fue nombrado barón de Kelvin en reconocimiento a sus logros y presidente de la Royal Society de Londres durante cinco años, falleció el 17 de diciembre de 1907 en Largs, Escocia. Su fortuna y sus logros en telegrafía han sido relegados al olvido, lo que queda es su hazaña intelectual y una losa funeraria en la abadía de Westminster.

nación que ocupa el tercio norte del Reino Unido y llamada, a la sazón, Iglesia de Escocia. Pero con Maxwell, tales precauciones resultaban fútiles. Su fe constituyó uno de los principios más importantes que guiaron su vida y era fruto de una intensa reflexión personal, con lo que dejaba muy poco margen a las imposiciones doctrinales de una secta.

Otra de las personas preferidas de Maxwell era el hermano mayor de su madre, su tío John. Abogado y juez, junto al padre de James compartían su pasión por la tecnología. Un día llevó a su sobrino a visitar a uno de los físicos ópticos más importantes de entonces, William Nicol, que había inventado una manera de polarizar la luz utilizando prismas cortando muy cuidadosamente cristales de espato de Islandia. Tan bueno fue su trabajo que los prismas hechos de este modo reciben el nombre de «prisma de Nicol». James quedó tan impresionado por la visita que decidió investigar la polarización de la luz por su cuenta. Maxwell también visitaba con frecuencia a su prima Jemima en Glasgow. Estaba casada con Hugh Blackburn, profesor de Matemáticas en la universidad muy amigo de uno de los grandes físicos de la época y que se convertiría en el patriarca de la ciencia inglesa, William Thomson. El profesor de Filosofía Natural vio en el joven James un tremendo potencial y entre ellos se entabló una amistad que duró toda la vida. Es más, él y Faraday fueron los dos científicos que más influyeron en su vida científica.

Cada minuto de su vida lo tenía ocupado: leía, escribía cartas o trabajaba en su laboratorio. Su única diversión «frívola» era jugar con el diábolo, cuya práctica continua lo convirtió en un experto. No hay duda que quería convertirse en científico aunque su padre pensaba que debía estudiar leyes. Para John, científico no era ni siquiera una opción.

CAPÍTULO 2

La teoría de la elasticidad

El siglo XIX fue hijo de la Revolución industrial y con él nacieron el liberalismo, el marxismo y el capitalismo industrial. Inglaterra se vio disparada a la cima de la economía durante la segunda mitad del siglo XVIII, mientras que la Europa continental tendría que esperar varias décadas a su industrialización. Sin embargo, estamos hablando de tecnología no de ciencia, que era considerada más o menos un pasatiempo de nobles y diletantes. Esta era la sociedad en la que Maxwell iba a intentar encontrar un lugar.

La Revolución industrial convirtió lo que era una sociedad rural en otra eminentemente urbana. La máquina de vapor drenó pantanos y marismas, abrió rutas por tierra y mar y las máquinas empezaron a sustituir la mano del hombre, comenzando por la industria textil, siguiendo por las minas y acabando en toda actividad económica. Y todo a causa de un escocés, James Watt.

Corría el año 1765. Hacía ocho años que James Watt (1736-1819), un melancólico e infatigable ingeniero nacido en la pequeña ciudad de Greenock, trabajaba en el taller de reparaciones de la Universidad de Glasgow. Había regresado a su Escocia natal tras renunciar a su anterior empleo en el taller de un constructor de instrumental científico en Londres. En la sala de reparaciones descansaba un modelo a escala de la máquina de vapor ideada por un quincallero sin estudios llamado Thomas Newcomen, utilizada por los miembros del Departamento de Filosofía de la Naturaleza en sus demostraciones. Frente a ella, Watt meditó sobre el modo de mejorar su rendimiento, y lo consiguió.

Una vez diseñada, el siguiente paso fue lanzar su máquina al mercado. Watt necesitaba encontrar un socio capitalista, y lo encontró en la figura del rico, jovial y hospitalario Matthew Boulton. Era propietario de una manufactura de seiscientos artesanos en Soho, Birmingham, dedicada a fabricar botones, mangos de espadas, hebillas de zapatos, cadenas de relojes y un amplio surtido

de bisutería. Convencido del tremendo potencial de la máquina, le prestó el dinero necesario para construirla. Para convertir su idea en realidad, Watt tuvo que hacer uso de los recursos de la creciente industria metalúrgica de la zona, en particular las increíblemente precisas máquinas de taladrar del magnate del hierro John Wilkinson.

En 1769, Watt patentaba la primera máquina de vapor realmente eficaz. En lugar de venderla, Boulton convenció a su socio inventor para que arrendara las unidades a sus clientes potenciales, las minas de carbón, que las querían para achicar el agua del interior de los túneles. Únicamente pedirían como pago la tercera parte del dinero que la empresa se ahorrase en combustible durante los tres primeros años.

De este modo tan original, ambos escoceses se hicieron millonarios en poco tiempo, cantidades que se multiplicaron cuando uno de los ayudantes de Watt, William Murdock, desarrolló una transmisión que convertía el movimiento de arriba-abajo de la bomba de agua en un movimiento circular: era el engranaje sol-planeta.

Con la nueva transmisión, lo que iba a ser una bomba extractora de agua se convirtió en la revolucionaria máquina que cambió el aspecto del planeta. Hacia 1795, Watt la había instalado en prácticamente todos los procesos manufactureros de Inglaterra.

La fábrica de Birmingham se erigió en la mensajera de una nueva era, y no solo por culpa de la máquina de vapor. Dos silenciosas pero profundas transformaciones nacieron allí. Una de la mano de Watt; la otra, de la de Murdock. Watt introdujo ingeniosos cambios en la construcción de sus motores con el objeto de maximizar el ritmo de producción. Los diferentes trabajos fueron divididos en otros más específicos —con operarios dedicados exclusivamente a ellos—: acababa de aparecer la cadena de montaje. A su vez, Murdock convirtió las oscuras noches inglesas en días luminosos. Fue el primero en hacer del alumbrado de gas una empresa económica y tecnológicamente viable. En 1792, introdujo el primer uso comercial del carbón para alumbrado en Inglaterra y hacia 1802 instaló quemadores de gas en una fábrica de Watt a las afueras de Manchester.

DISIDENTES

La Revolución industrial debió muy poco a la ciencia, aunque los hombres que la dirigieron estaban completamente imbuidos en el espíritu científico. El valor útil de la ciencia fue muy bien comprendido por los industriales del norte de Inglaterra, y descubrieron que la razón por la cual no había tenido éxito en el pasado era porque quienes la cultivaron no habían sido hombres prácticos. Las viejas universidades, anquilosadas en su propia tradición, no servían para divulgar esta nueva visión. El único lugar donde encontró un lugar de enseñanza fue en las academias disidentes y, contradiciendo la norma, las universidades escocesas. Durante todo el siglo XVIII, ambas instituciones impartieron la mejor formación científica del mundo.

El poder tecnológico inglés se encontraba en manos de los herederos de los perseguidos por el Gobierno, aunque vivían cómodamente instalados jugando con las reglas sociales de la rígida y cínica moral inglesa. Sin embargo, en el continente, y particularmente en Francia, las aguas andaban algo revueltas. Si Inglaterra fue el seno de una revolución técnica, Francia se convirtió en la cuna de un nuevo orden político. En los últimos días de la monarquía francesa, cuando aires revolucionarios empezaban a soplar por París, los científicos estaban plenamente imbuidos en ese espíritu de progreso y cambio que se avecinaba. La gran *Enciclopedia de las artes, las ciencias y los oficios* de Diderot y D'Alembert era la biblia del nuevo liberalismo unido al librepensamiento, la ciencia, la industria y el *laissez faire*.

La Revolución francesa concedió a los científicos la oportunidad que aguardaban. Eran los tiempos de la razón, y en la destrucción de los últimos vestigios feudales la ciencia desempeñó un papel director.

En la construcción de la nueva sociedad, los científicos cargaron sobre sus hombros el cambio de la obsoleta maquinaria del Estado y de la educación. Su primera medida fue la reforma de las unidades de pesos y medidas con la implantación del sistema métrico decimal en 1799. La tarea fue ardua y difícil, como bien queda atestiguada por la persistencia de los antiguos sistemas de medida

UN MUNDO SUCIO



El inventor escocés James Beaumont Neilson (1792-1865).

La hulla fue el combustible de la Revolución industrial. Nada podía funcionar sin ella. Conocida de antiguo, se inició su extracción masiva en el siglo XVIII, a partir de la invención de la máquina de vapor. Así, de 30 millones de toneladas de producción mundial de hulla en 1820 se pasó a 125 millones en 1860 y 340 millones en 1880. El gas necesario para el alumbrado provenía de la destilación de la hulla, que extraía la mayor parte de los compuestos volátiles atrapados en su interior y la convertía en coque. La amarillenta llama del gas de hulla iluminó las calles de Londres en 1812, permitió conciertos vespertinos en el Brighton Pavilion a partir de 1821 y leer el periódico en los hogares en 1829. Pero la nueva iluminación también tuvo sus detractores. La industria ballenera inglesa veía peligrar su supervivencia, pues el aceite de los cetáceos era el principal comburente de las lámparas de gas. Sin necesidad de aceite no eran necesarias más capturas, lo que implicaba menos marineros experimentados, y Gran Bretaña los necesitaba para su Armada debido a la guerra con Francia. En 1824, el gerente escocés de un alto horno, James Beaumont Neilson, patentaba una idea para quemar con mayor eficiencia el carbón en el horno. Si se hacía pasar el aire frío usado para avivar las llamas de la caldera por una tubería al rojo, calentándolo a 300 °C, la eficiencia del horno aumentaba de tal forma que, con la misma cantidad de hulla, se producía tres veces más hierro. Once años después, todas las herrerías escocesas habían adoptado la técnica de Neilson y convertían a su país en uno de los más industrializados del mundo.

Nuevos productos

La destilación de la hulla también tenía sus inconvenientes. El principal era un residuo negro, maloliente y fangoso generado durante el proceso: el alquitrán. Completamente inútil, las destilerías lo arrojaban al río o estanque más próximo. A mediados del siglo XIX, el Támesis estaba tan contaminado que el Parlamento tuvo que cerrar sus puertas a causa del hedor. El problema era grave. No podía dejar de producirse el gas necesario para el alumbrado y no se podía seguir envenenando el agua. Un grupo de químicos alemanes encontró la solución: destilar también el alquitrán. Gracias a ello se obtuvo un cierto número de productos útiles, como el queroseno para las lámparas de aceite, tintes sintéticos, antisépticos y la aspirina —más concretamente el fenol, de donde se podía obtener fácilmente y con un gasto mínimo el ácido acetilsalicílico—.

en los países en los que no penetraron las ideas de la revolución. Su segunda gran tarea fue la reforma de la educación. Siguiendo el estilo de las escuelas disidentes y las universidades escocesas, fundaron la École Normale Supérieure, la École de Médecine y la École Polytechnique, faro y guía de lo que acabaría por ser la enseñanza científica y los institutos de investigación siglos después.

El científico aficionado, con el laboratorio de investigación instalado en su propia casa, se tornó en el científico asalariado que investigaba y enseñaba. La nueva educación abrió las puertas a jóvenes de todas las capas sociales para que las mejores mentes, viniesen de donde viniesen, se dedicaran a la ciencia. La llegada de Napoleón al poder no cambió este estado de cosas. El emperador mantuvo e impulsó la ciencia. Es más, las guerras napoleónicas sirvieron para que la ciencia francesa alcanzara una superioridad que perduró durante gran parte de la primera mitad del siglo XIX. El bloqueo británico, por ejemplo, se sintió con especial intensidad en el abastecimiento de sosa y azúcar, lo que obligó a la industria química a explorar nuevos caminos. Consecuencia: Francia dominó la investigación química en Europa durante más de treinta años.

SELECCIÓN SOCIAL

Mientras la Revolución triunfaba en París, en Londres se producía una contracorriente desesperada de apego a las viejas instituciones sociales que, sin dificultar la marcha de la ciencia, la ralentizó. El único esfuerzo científico análogo al iniciado en el continente se encuentra en la fundación de la Royal Institution en 1799. Su creación se debió al empeño de Benjamin Thompson (1753-1814), conde de Rumford. Maestro de escuela, Thompson fue uno de los primeros colonos norteamericanos y teniente coronel de la armada inglesa.

A Thomson no le costó mucho tiempo descubrir que el triunfo de la Revolución industrial dependía de un nuevo tipo de ingeniero, más asentado en los conocimientos científicos y menos en

la tradición ciega. Persuadió a las fortunas inglesas para que donaran el dinero necesario y así fundar una institución, patrocinada por la Corona, que, en sus propias palabras:

> [...] difundiera el conocimiento y facilitara la instrucción general en los inventos mecánicos corrientes, la enseñanza filosófica y los experimentos y aplicaciones de la ciencia en los objetos comunes de la vida.

Poco duró el sueño de Thompson. El primer director de la Royal Institution, Humphry Davy (1778-1829), fue el científico más extravagante de aquellos días, aficionado a la ostentación y la buena vida. Miembro de la Royal Society, armado caballero en 1812 y poseedor de la Legión de Honor impuesta por el mismísimo Napoleón en reconocimiento a sus trabajos sobre galvanismo y electroquímica —se le puede considerar el padre de esta disciplina—, en su discurso inaugural de 1802, Davy, a la sazón con veintitrés años, expresó perfectamente el sentir de la época:

> La desigual división de la propiedad y del trabajo, y la diferencia de rango y condición en el género humano son las fuentes del poder en la vida civilizada, sus causas motoras e, incluso, su auténtica alma.

Davy hacía suya cierta tendencia entre los científicos —pertenecientes en su mayor parte a la burguesía— de la diferente gradación intelectual de los seres humanos en función de su raza y extracción social. Con esta visión tan conservadora, no es de extrañar que la Royal Institution se convirtiera en un centro conformista destinado al solaz y la complacencia de la clase media alta. Quizá la prueba más palpable de ello fue la clausura de la puerta trasera, por donde cualquiera podía entrar a las sesiones sin ser visto. Había que conseguir una concurrencia más selecta. A pesar de tales impedimentos, en este ambiente fue donde prosperó el único laboratorio subvencionado y donde se realizaron la mayoría de los descubrimientos de la época. Y aunque su labor de enseñanza se limitaba a conferencias públicas, estas atrajeron la atención de un joven aprendiz de encuadernador llamado Michael

CAÍDA Y ASCENSO

Los disidentes aparecieron en 1660, al extinguirse la llama del cambio social y político iniciado por Cromwell al vencer en la guerra civil inglesa. Restaurada la monarquía, la nueva legislación obligó a todas las iglesias protestantes —valedoras de Cromwell— a admitir su derrota y jurar lealtad a la monarquía y a la Iglesia anglicana. Aquellos que no aceptaron este juramento fueron llamados disidentes y sus vidas se convirtieron en casi un infierno. El Parlamento promulgó una serie de leyes, condensadas más tarde en el Código de Clarendon, donde se privaba a los disidentes de cualquier derecho a trabajar para el Gobierno o la Iglesia y de organizar reuniones. Los funcionarios municipales debían ser anglicanos y ningún ministro podría cambiar nada de lo establecido por la Iglesia. A consecuencia de este código, más de un millar de ministros fueron expulsados de sus parroquias. En 1664 se aprobó otra ley con la que se prohibía cualquier reunión religiosa de más de cinco personas que no fuera de la Iglesia Anglicana. El castigo era la deportación a colonias, excepto a la puritana Nueva Inglaterra, donde probablemente los disidentes serían recibidos con los brazos abiertos. Profesores y clérigos disidentes tenían prohibido acercarse a menos de ocho kilómetros de un municipio.

Centros de sabiduría

Las condiciones de vida eran tan duras que muchos emigraron a América o a Holanda. A los que se quedaron, el Gobierno solo les había dejado un camino libre: dedicarse al comercio y la industria. Por eso, no es extraño que a principios del siglo XVIII la mayoría de las industrias se encontrasen en manos de disidentes y que la persecución implacable a la que estaban sometidos les convirtiera en librepensadores. Sus academias, inicialmente concebidas para aquellos que quisieran vestir los hábitos, se reconvirtieron en centros donde se enseñaba ciencia, ingeniería y finanzas. Fueron quienes estudiaron en sus aulas los que dirigieron los caminos de la técnica inglesa.

La rosa de los vientos es la base del emblema de la Comunión Anglicana, que recuerda la dispersión de la comunidad anglicana por todo el mundo. El de la fotografía se encuentra en el suelo de la catedral de Canterbury.



Faraday, el científico experimental que más tarde dominaría la institución durante más de cuarenta años. Por desgracia, no había puestos para los cientos de potenciales Faradays que hubieran podido beneficiarse de su laboratorio. Inglaterra perdió así un gran número de excelentes cerebros.

«La importancia de Maxwell en la historia del pensamiento científico es comparable a la de Einstein (quien se inspiró en él) y a la de Newton (cuya influencia él redujo)»

— IVAN TOLSTOY, BIÓGRAFO DE MAXWELL, EN *JAMES CLERK MAXWELL, A BIOGRAPHY* (1983).

Por todo ello, en la Gran Bretaña de mediados del siglo XIX no se usaba la palabra «científico». Los físicos y químicos se llamaban a sí mismos «filósofos naturales», y los biólogos, «historiadores naturales». Pocos eran los que trabajaban profesionalmente en la ciencia y muchos de los que investigaban eran diletantes, caballeros de la clase acomodada con ingresos suficientes para poder dedicar su tiempo a lo que más les gustaba. Otros eran clérigos, médicos, abogados u hombres de negocios que tenían la ciencia como su *hobby*; este era el caso del padre de James. Las posibilidades de ganarse la vida en un puesto en una universidad, un observatorio o en lugares como la Royal Institution eran muy complicadas: había pocas plazas y raramente quedaban vacantes porque sus titulares solían quedarse en ellas de por vida. Así que las pocas veces que una quedaba libre, la pelea por ella era muy dura y no podía esperarse llevar una vida regalada, pues la paga era bastante baja. Al contrario de lo que estaba sucediendo en Francia, la institucionalización de la profesión del científico no era una idea que tuviera muchos adeptos. En la Inglaterra de Maxwell, a la ciencia se la consideraba interesante, pero no útil. Quizá por ello el historiador Charles Gillispie dijera que el modelo de ciencia en Francia y en Gran Bretaña podía describirse como el del funcionario y el del voluntario.

Una de las razones de este papel segundón de la ciencia se encuentra en que los grandes avances en la industria y el transporte tuvieron su origen en la mente de ingenieros con poca o nula pre-

paración académica: James Watt era el que arreglaba los instrumentos que se estropeaban en la Universidad de Glasgow; George Stephenson, el inventor de la locomotora, fue analfabeto hasta los dieciocho años; y algo tan fundamental para la navegación como es determinar con precisión la longitud de un barco en el mar, no lo resolvió ningún astrónomo, sino un relojero sin estudios llamado John Harrison. ¿Para qué servía entonces la universidad? Solo algunos brillantes científicos, como Charles Wheatstone o William Thomson, habían inventado algunos ingeniosos dispositivos para el recién llegado mundo de la telegrafía. De hecho, esta fue una empresa económicamente rentable gracias a los esfuerzos del oficial del ejército William F. Cook y de Wheatstone —profesor del King's College de Londres— en 1837. Pero no apagó el sentir unánime de que la ciencia era un magnífico *hobby* para un caballero, pero una profesión muy poco conveniente. Nadie se daba cuenta de que la industria realmente iba a empezar a conocer los beneficios de la especialización científica cuando la universidad empezara a producirla, como efectivamente así ocurrió. Este era el mundo con el que James Clerk Maxwell iba a lidiar.

PREPARACIÓN ACADÉMICA

Por suerte, el joven James aún no tenía que tomar una decisión. Su siguiente paso fue matricularse en la Universidad de Edimburgo para estudiar matemáticas bajo la guía de Philip Kelland —el profesor que dio el visto bueno a su primer trabajo científico—, filosofía natural con James Forbes y lógica con el metafísico William Hamilton, cuya contribución a la filosofía ha sido escasa, pero su labor como profesor fue extraordinaria, al estimular un sano escepticismo en sus alumnos. Así que, con dieciséis años, ingresó en la universidad con su cerebro suspirando por la ciencia y las matemáticas, pero dispuesto a estudiar leyes porque su corazón le urgía complacer a su padre.

Las universidades escocesas llevaban con orgullo haber sido parte fundamental de la Revolución industrial y anunciaban al

mundo que su formación era capaz de hacer de cualquier joven un gran emprendedor, capaz de enfrentarse a todos los retos que pudiera tener en cualquier empleo. James estaba especialmente interesado en las clases de filosofía —entonces se llamaba «filosofía mental»— de Hamilton, un profesor de gran carisma y en quien Maxwell descubrió que a veces la respuesta a algunas preguntas llega como cuestiones aún más profundas. La influencia de Hamilton fue profunda y decisiva: compartía la postura de su profesor al ridiculizar todos los intentos de demostrar la existencia de Dios, sosteniendo que el conocimiento y la lógica, a pesar de ser herramientas insustituibles para investigar el universo, eran inútiles a la hora de encontrar la causa que lo originó. Sin embargo, Maxwell estaba totalmente convencido de que su maestro se equivocaba cuando minusvaloraba las matemáticas. Esto era así porque Hamilton aceptaba gran parte de la postura de la corriente intelectual llamada «del sentido común», que rechazaba cualquier método que no procediera directamente de datos observados: para los seguidores de dicha corriente, el progreso científico se producía por la simple acumulación de resultados experimentales. Por otro lado, también compartía la idea de Kant de que todo conocimiento es relativo: no sabemos nada de las cosas en sí mismas si no por su relación con las demás. Esta idea permeó en el pensamiento científico de Maxwell, como él mismo puso de manifiesto en un ejercicio que realizó para su profesor:

> La única cosa que se puede percibir directamente por los sentidos es la fuerza, que podemos reducir a luz, calor, electricidad, sonido y todas las otras cosas que podemos percibir por los sentidos.

Maxwell mantuvo esa postura toda su vida, de manera que dos décadas más tarde corrigió en el borrador del libro *Treatise on Natural Philosophy* de sus amigos Thomson y Tait el concepto de masa, diciendo que «los sentidos nunca perciben la materia».

Las lecciones de Hamilton definieron la forma en que Maxwell enfocaría sus investigaciones. Así, su teoría electromagnética personifica la idea de que las cosas que podemos medir directamente, como la fuerza que ejerce un hilo conductor sobre una aguja iman-

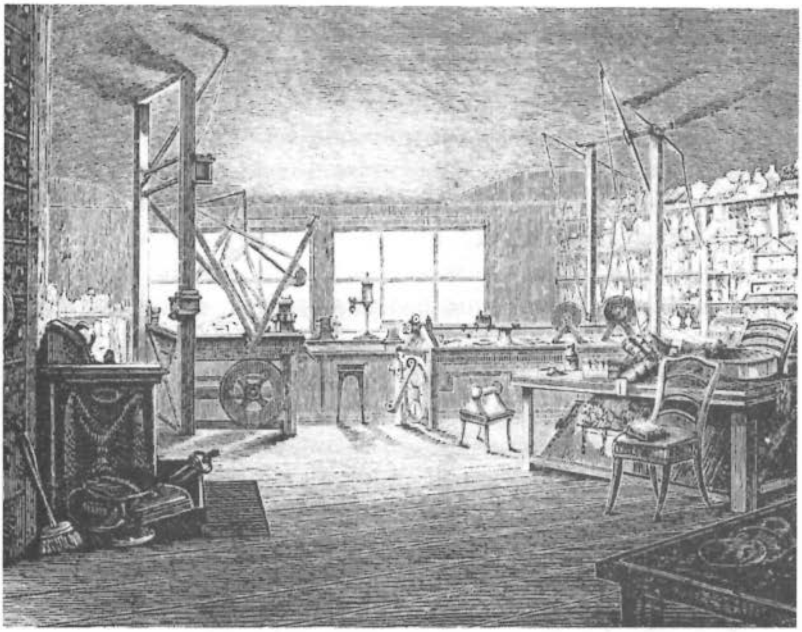
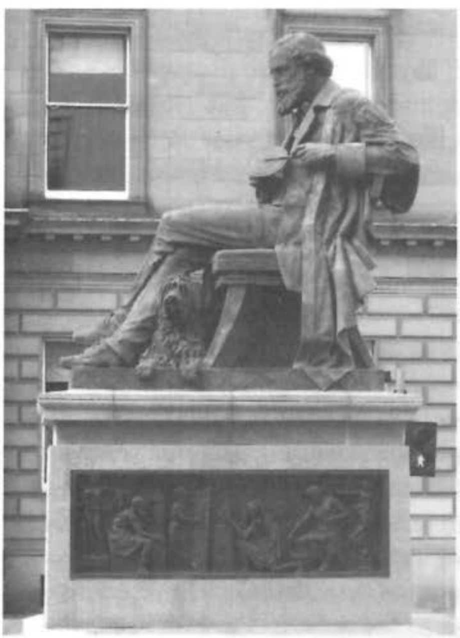
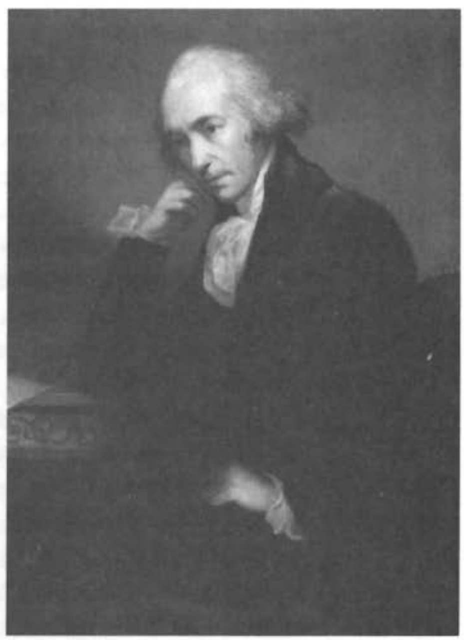


FOTO SUPERIOR:
Grabado del taller de James Watt. El matemático e ingeniero escocés ayudó en el desarrollo de la máquina de vapor, fundamental en la Revolución industrial.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Estatua de Maxwell en George Street, Edimburgo. Con tan solo dieciséis años, el físico escocés se matriculó en la universidad de dicha ciudad.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Retrato de James Watt, por Carl Frederik von Breda en 1792.





tada, es la expresión de un proceso más profundo que está más allá de nuestra capacidad de visualización; en este caso, la intensidad del campo electromagnético.

EL EXPERIMENTADOR

James no era solo un pensador; también gustaba de la experimentación, y nada mejor para contrarrestar las clases de filosofía de Hamilton que las del amigo de su padre, James Forbes (1809-1868). El joven Maxwell pasaba horas y horas en el laboratorio de su profesor, que le había dado permiso para desarrollar todo tipo de experimentos. De este modo, aprendió el manejo de los diferentes aparatos y construyó los que necesitaba. La experiencia le pareció tan provechosa que años más tarde, cuando fue nombrado director del laboratorio Cavendish en Cambridge, siempre dejó que sus estudiantes hicieran sus propios experimentos y nunca dijo a nadie qué investigación hacer salvo que se lo preguntaran.

Forbes también le ayudó a pulir su estilo de escribir hasta el punto que su prosa acabó siendo tan inconfundible como lo son los cuadros de Gauguin o las partituras de Mozart. Según comenta el ingeniero Basil Mahon en su biografía sobre Maxwell:

> [...] tenía un tono autorizado pero fresco e informal; las ecuaciones surgían naturalmente de sus argumentos. Los conceptos aparecen en lugares tan sutiles y originales que los estudiosos aún se preguntan qué quería decir exactamente.

Forbes era un experimentado escalador y había pasado muchas temporadas en los Alpes; es posible que de ahí naciera su pasión por las ciencias de la Tierra, que transmitía a sus alumnos. Inventor del sismógrafo, fue la primera persona que hizo un estudio serio sobre el flujo del hielo en los glaciares. Todo lo que hacía o decía era cuidadosamente asimilado por Maxwell, al que enseñó a ser disciplinado en la toma de datos y en el diseño de

experimentos. Cuando murió el 21 de diciembre de 1868, Maxwell dijo que «amaba a James Forbes».

Maxwell asistía a las clases de matemáticas de Philip Kelland y a las de química de un tal profesor Gregory, que dictaba sus clases magistrales sin pisar el laboratorio, cuyas prácticas las dejaba para horario extraacadémico a cargo de quien llamaba «Kemp el Práctico». Por su parte, el señor Kemp era propenso a describir los procedimientos que Gregory enseñaba en sus clases como «inútiles y perjudiciales, inventados por los químicos que quieren hacer algo». De estas decepcionantes clases, James extrajo una lección que llevaría consigo siempre: el trabajo de laboratorio no solo era esencial para desarrollar una buena enseñanza de las ciencias, sino que debía formar parte de la propia clase y no ser algo extraordinario.

> «Nunca he disuadido a nadie de empezar un experimento; si no encuentra lo que busca, puede hallar alguna otra cosa.»
>
> — Maxwell, en referencia a la libertad que daba a los estudiantes del laboratorio Cavendish al realizar sus experimentos.

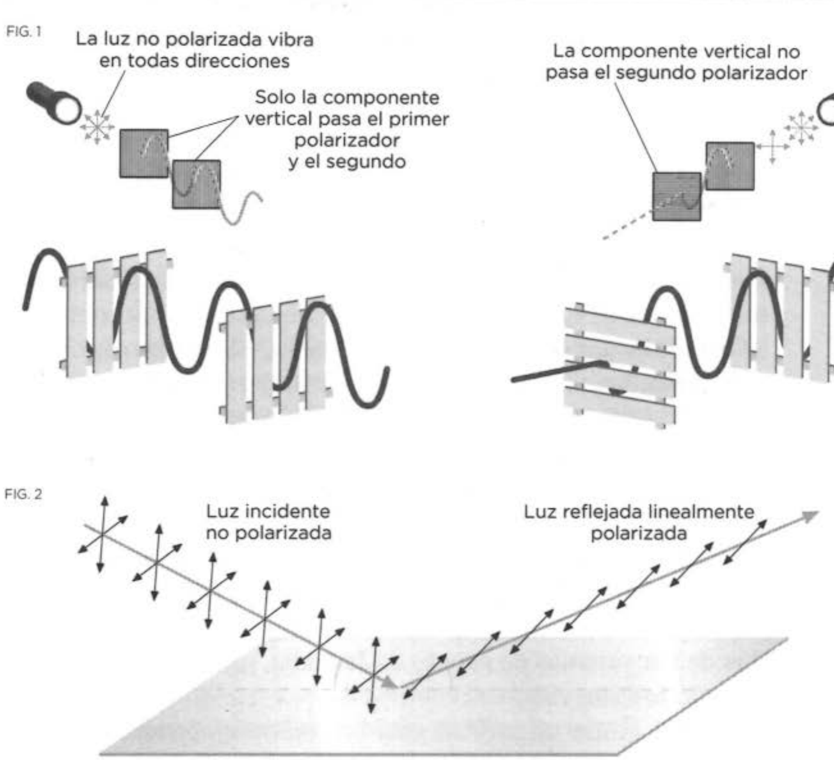
La mente inquieta de James no podía alimentarse solo de las clases de la universidad. Su formación intelectual también llegó de sus lecturas de los clásicos, como la *Óptica* de Newton, *Cálculo diferencial* de Cauchy, *Tratado de mecánica* de Poisson o *Teoría analítica del calor* de Fourier; estaba tan entusiasmado con este último libro que gastó la importante suma de 25 chelines para tener su propio ejemplar. La lectura ocupaba una fracción importante de su tiempo, que llenaba no solo con textos científicos sino también filosóficos, como el *Leviatán* de Hobbes o la *Teoría de los sentimientos morales* de Adam Smith; tampoco dejó a un lado el latín o el griego. Además, y solo para entretenerse, leía novelas y poesía.

Su inquietud científica le llevó a construir un pequeño laboratorio encima del edificio que su padre había utilizado para el lavado y planchado de la ropa de los miembros de la granja. Allí pasaba las horas durante las largas vacaciones de las universida-

des escocesas, que comenzaban a finales de abril y se prolongaban hasta principios de noviembre. De este modo, los estudiantes podían ayudar en la época más dura de la agricultura, las estaciones de primavera y verano. Maxwell definió su laboratorio como sigue:

> Tengo una puerta vieja sujeta por dos barriles y dos sillas, de las cuales una es segura, y un tragaluz que puedo abrir y cerrar.
> Sobre la puerta, o mesa, hay muchos cuencos, jarros, platos, botes... que contienen agua, sal, soda, ácido sulfúrico, vitriolo azul, grafito; también cristal roto, hierro, hilo de cobre, cera de abeja, cera para sellar, pizarra, resina, carbón vegetal, una lente, un aparato galvánico de Smee [un kit eléctrico de entonces que incluía una batería], y una variedad incontable de pequeños escarabajos, arañas y cochinillas que caen en los diferentes líquidos y mueren envenenados.

Si la práctica lo es todo, James estaba aprendiendo a pasos agigantados con sus experimentos sobre todo lo imaginable y preparándose para lo que estaba por llegar. Para sus experimentos eléctricos chapaba con cobre viejos botes de mermelada y divertía a la muchachada del lugar con sus pruebas químicas, dejando que escupieran en una mezcla de dos polvillos blancos y viendo cómo estos cambiaban su color al verde. Pero lo que realmente le llamaba su atención era la luz polarizada, luz en la que todos los puntos de la onda vibran en el mismo plano. Esto podemos observarlo fácilmente usando dos gafas de sol con cristales polarizados. Si las enfrentamos de modo que quede un cristal frente al otro y giramos una de ellas, se observa que llega un momento en que no pasa nada de luz. Esto sucede porque los dos cristales solo dejan pasar la luz cuya vibración se verifica en la dirección vertical del cristal. Al girar el segundo, lo hemos colocado a 90° respecto al primero, luego no dejará pasar la luz (figura 1). Le fascinaban los colores que emergían al iluminar con este tipo de luz los cristales no templados (que se han enfriado tan rápido que las tensiones que surgen en ellos quedan como congeladas, debido a que la parte exterior se enfría más deprisa que la interior). Pero su interés iba más allá de lo pura-



mente estético: quería comprender la estructura y la distribución de esas tensiones. Para hacerlo, cortaba pedazos de cristal de viejas ventanas, los calentaba hasta ponerlos al rojo vivo y luego los enfriaba con rapidez.

En un principio, no tenía ningún instrumento que pudiera producirle luz polarizada, así que tuvo que improvisar. Sabía que cuando un haz de luz se refleja bajo cierto ángulo sobre una superficie de cristal, parte del haz resultante sale polarizado (figura 2). Así que se construyó un polarizador que consistía en una caja de cerillas y dos trozos de cristal pegados con cera de sellar en el ángulo correcto. También sabía que había ciertos cristales naturales, como el frágil salitre, que polarizaban la luz al pasar por ellos;

FIGURA 1: **Una imagen para entender la polarización de la luz es imaginar una cuerda que vibra verticalmente (esto es, que está polarizada verticalmente) al pasar por dos vallados.**

FIGURA 2: **La reflexión de un haz de luz sobre un cristal hace que esta salga polarizada.**

dedicó muchas horas a pulir delgadas láminas de esta peculiar mezcla de nitrato sódico y potásico hasta conseguirlo. En una ocasión escribió:

> Estuvimos en el Castillo Douglas ayer y conseguí cristales de salitre, que he cortado en láminas hoy esperando ver anillos.

Los patrones que observó con este método fueron aún más fascinantes. Para poder reproducirlos utilizó una cámara lúcida, un dispositivo que superpone lo que se está viendo con lo que se está dibujando. Había sido descrita por el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) en su libro *Dióptrica*, pero que cayó en el olvido hasta que en 1806 la reinventó el físico británico William Hyde Wollaston (1776-1828), que se había hecho rico perfeccionando un método para procesar el platino y que, en el proceso, acabó descubriendo el paladio y el rodio. James pintó con acuarelas las estructuras coloreadas y se las envió a William Nicol, el famoso óptico que le había presentado su tío dos años antes. Nicol quedó tan impresionado por este trabajo que le regaló dos de sus prismas de espato de Islandia, un obsequio que James apreció toda su vida.

Pero pintar acuarelas con los colores creados con la luz polarizada no era el objetivo que Maxwell perseguía, sino más bien buscaba el principio de algo más profundo. ¿Podría usar su método para mostrar los patrones de distorsión en sólidos de diferentes formas y sometidos a distintos tipos de esfuerzos mecánicos? James sabía que era un tema que interesaba mucho a los ingenieros. Para comprobar si su idea funcionaba, necesitaba un sólido transparente al que pudiera dar distintas formas, estirarlo, retorcerlo, comprimirlo... ¿Serviría la gelatina? Obtenerla no era complicado; bastaba con acercarse a la cocina. Así que construyó un anillo delgado de gelatina cuya parte interior era un trozo de corcho, y lo retorció para producir una tensión en la jalea. Entonces, envió luz polarizada sobre ella y pudo ver los patrones de luz provocados por la tensión: Maxwell acababa de desarrollar el método fotoelástico, bien conocido en la actualidad por los ingenieros.

CURVAS Y SÓLIDOS ELÁSTICOS

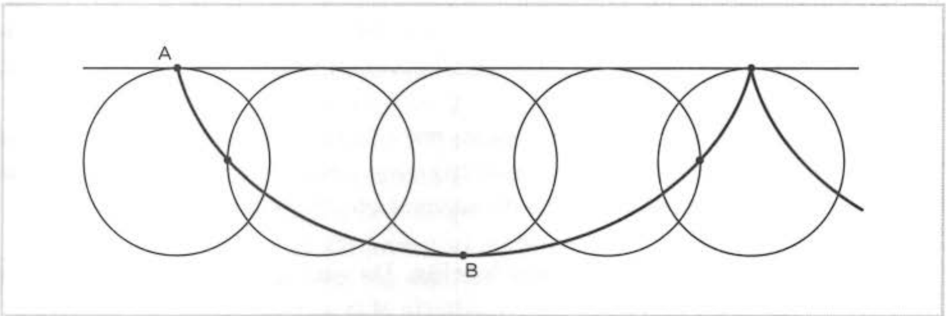
Al mismo tiempo, Maxwell continuó con sus investigaciones matemáticas siguiendo su primer trabajo sobre los óvalos: en febrero de 1849, Kelland leyó su artículo «The Theory of Rolling Curves» en la Royal Society de Edimburgo, que trata de la figura que aparece cuando una curva rueda a lo largo de otra. Un ejemplo es la cicloide, que se genera si seguimos un punto dado de una circunferencia cuando rueda por una línea recta (véase la figura).

La forma de enfocar esta tarea —recordemos que en 1848 Maxwell tenía solamente diecisiete años y estaba en su segundo año de universidad— apunta la forma de trabajar que Maxwell tendría en la madurez: exhaustivo en los conceptos usados en el tema así como en la bibliografía, donde hacía referencia tanto a trabajos clásicos en la materia como a los más recientes, y sistemático en su alcance, sin dejar nada por tratar y buscando el mayor número posible de generalizaciones. Uno de los resultados más simples que encontró en este estudio matemático fue el siguiente:

> Si la curva A al rodar por una línea recta produce la curva C, y si la curva A cuando rueda sobre sí misma produce la curva B, entonces cuando la curva B rueda sobre la C produce una línea recta.

En ese segundo año, Maxwell continuó asistiendo a las clases de matemáticas y a las de metafísica de Hamilton, que fomentó su

Si unimos un lapicero a un punto de una circunferencia y hacemos rodar a esta, sin deslizar, por una recta, la figura que se genera es una cicloide de extremo en A y altura máxima en B.



aprecio por la filosofía. En ese curso pasó a formar parte del primer grupo de los tres en que Forbes dividía su clase de ciencias, pues en el primer año su escaso conocimiento de cálculo hizo que se tuviera que quedar en el segundo. En este período, Forbes se concentró, como hizo el año anterior, en la mecánica y en las propiedades físicas de los cuerpos y la física del calor, y bastante en la óptica.

Mientras, Maxwell continuó con sus investigaciones sobre los patrones de luz que surgían al hacer incidir luz polarizada en sólidos sometidos a presión, y comenzó a desarrollar una explicación de los efectos fotoelásticos recurriendo a la teoría de los sólidos elásticos. La guía de Forbes en este punto fue inestimable, pues él mismo acababa de presentar un trabajo en la Royal Society de Edimburgo sobre cómo medir la capacidad de distendirse de los sólidos. El resultado fue un trabajo soberbio, «On the Equilibrium of Elastic Solids». Al presentar una teoría matemática de los sólidos elásticos, Maxwell proveyó a los científicos del marco conceptual para discutir la elasticidad y la fotoelasticidad. Y todo había salido de la mente de un joven de tan solo dieciocho años.

El artículo introducía por primera vez una teoría matemática general de la elasticidad, aplicada después a casos particulares de deformación elástica (algunos de los cuales ya habían sido discutidos por otros autores) y concluía con una descripción de la fotoelectricidad. Algunos de los resultados teóricos los comprobó con sus propios experimentos e iluminó el artículo con cuidadosos dibujos en acuarela donde mostraba las estructuras coloreadas que surgían al utilizar luz polarizada. Maxwell trabajó duro en el artículo, pero lo redactó con un estilo muy enrevesado y no cuidó en demasía la formulación matemática de sus ideas, lo que convertía sus explicaciones en algo difícil de seguir. Nada más recibirlo, Forbes le escribió una dura regañina por ser tan descuidado:

> Es perfectamente evidente que es inútil publicar un artículo para uso de los científicos cuando hay pasos que, en muchos lugares, no puede seguirlos ni un experto matemático como el profesor Kelland.

James aprendió la lección. De este tirón de orejas nació la forma de redactar que destilaría Maxwell en todos sus escritos.

ESTIRAR, RETORCER Y COLOREAR

La teoría matemática de la elasticidad había sido trabajada por grandes figuras de la ciencia como Navier, Poisson y Cauchy. Para ello habían formulado diferentes hipótesis sobre cómo eran las interacciones moleculares en los cuerpos elásticos. Maxwell decidió no ir por ese camino. Prefería la idea que el físico irlandés George Gabriel Stokes (1819-1903) había presentado en la Cambridge Philosophical Society en 1845 bajo el título «On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of Equilibrium and Motion of Elastic Solids». Stokes, aunque convencido de que la razón última del comportamiento de los sólidos elásticos se encontraba en las interacciones de las moléculas que los componían, había resuelto el problema desde un punto de vista puramente geométrico al presentar un modelo que era independiente de cualquier hipótesis física sobre las fuerzas moleculares en juego.

Siguiendo a Stokes, Maxwell rechazó para su teoría cualquier suposición sobre las fuerzas físicas, descartando las teorías de las fuerzas centrales de Navier y Poisson, que pretendían explicar la elasticidad como moléculas actuando a distancia. El enfoque de Maxwell fue fenomenológico: partiendo de los resultados obtenidos en sus experimentos, que establecían las relaciones entre la presión y la compresión de los sólidos elásticos, construyó unas ecuaciones que dieron cuenta de todas las leyes experimentales obtenidas hasta la fecha. Esta forma de atacar el problema, donde diferenciaba claramente el modelo geométrico de las hipótesis físicas, volvería a utilizarla con toda su potencia cuando años más tarde se enfrentara al campo electromagnético y las líneas de fuerza postuladas por Faraday.

Ahora bien, esta distinción no era una idea original suya: era característica de las matemáticas de Cambridge y ya había sido usada profusamente por Airy, Thomson y el propio Stokes. Resulta curioso que sin haber estudiado en Cambridge, Maxwell estuviera adoptando su estilo de trabajo.

Otro de los trabajos de juventud de Maxwell —y uno de los más importantes— también fue influenciado por Forbes: la teoría del color. En 1849, el profesor mostró a su joven estudiante los

experimentos que estaba realizando sobre mezcla de colores, al tiempo que preparaba una revisión sobre el problema de proporcionar un método y una nomenclatura para la clasificación de los mismos. Los experimentos de Maxwell consistieron en observar los tonos generados por un disco en rotación dividido en sectores de distintos colores en los que se podía variar el área. Pero su trabajo fundamental sobre la clasificación de los colores estaba aún por llegar. Primero debía abandonar Edimburgo y marchar a Cambridge.

El primer año en la Universidad de Edimburgo, Maxwell había disfrutado de la compañía de sus amigos Lewis Campbell y Peter Guthrie Tait. Pero al terminar, Lewis marchó a Oxford y Tait a Cambridge. En su segundo año en Edimburgo, James sintió que se estaba quedando estancado mientras que sus amigos comenzaban una nueva y excitante aventura. Habló con su padre y ambos resolvieron que la mejor opción para su futuro era marchar a Cambridge. Forbes le recomendó que fuera a su *alma mater*, el Trinity College. Tait se encontraba en St. Peter's, conocido entonces como Peterhouse, un *college* pequeño y selecto. El hermano pequeño de Lewis Campbell, Robert, estaba en Caius, muy recomendable, pero tan lleno de estudiantes que los nuevos debían alojarse fuera de sus instalaciones, así que decidió acomodarse en Peterhouse.

James dejó Edimburgo con diecinueve años y llegó a la exquisita Cambridge con su acento de Galloway, sin conocimiento alguno de lo que era elegante e indiferente a cualquier tipo de lujo: viajaba en tercera clase porque prefería sus asientos duros. Su amigo Lewis Campbell lo describió así en su diario:

> Sus formas son muy peculiares, pero su sentido común, buen humor e incalculable valía borra todas sus rarezas en la vida social del *college*. No tengo duda alguna de que es una persona distinguida.

Con semejante bagaje, el 18 de octubre de 1850 James llegó a su habitación en Peterhouse, el más antiguo de los *college* de la universidad.

CAPÍTULO 3

En el río Cam

En el siglo XIX, la educación universitaria inglesa estaba dominada por dos universidades, Oxford y Cambridge, y las ciencias estaban especialmente presentes en la segunda. Su sistema de evaluación, el Mathematical Tripos, era la joya de la corona de la educación superior, y a ella se tuvo que enfrentar el joven Maxwell. Esto le ayudó a centrar su manera de investigar, sobre todo a la hora de matematizar sus ideas.

James viajó a Cambridge con su padre. En el camino se detuvieron para visitar dos de las catedrales más emblemáticas de la arquitectura inglesa: la de Peterborough, uno de los edificios más representativos de la Inglaterra del siglo XII, donde se encuentra enterrada Catalina de Aragón, reina consorte de Inglaterra y la primera de las seis esposas del más absolutista de los reyes ingleses, Enrique VIII, y la catedral de Ely, una de las maravillas del arte gótico inglés y la sede catedralicia más cercana a Cambridge.

Como muchas ciudades inglesas, la notoria ciudad universitaria, que toma su nombre del río Cam, conoció un crecimiento significativo durante el siglo XIX. En 1845, y tras una fuerte oposición por parte de la población, el ferrocarril llegó a la ciudad, lo que supuso un impulso económico significativo.

Totalmente emocionado, Maxwell fue a presentarse a su tutor —cada estudiante de un *college* tiene asignado uno destinado a velar por su formación— y de ahí a su habitación, donde empezó a desenvolver con cuidado todo el instrumental con el que había estado realizando sus investigaciones en Escocia: imanes, gelatina, cristal... y sus muy apreciados prismas de Nicol. Después, un té con su amigo Tait, que se alargó en exceso, y al día siguiente el habitual *tour* por el resto de los *college* de Cambridge, incluyendo las esculturas de Newton y Francis Bacon en la capilla del Trinity. Hasta le divirtió ver colgada en el tablón de anuncios del

zaguán de Peterhouse una nota de la dirección amenazando con la expulsión de cualquiera que visitara los establos que se habían levantado en las tierras del *college* debido a la «naturaleza inmoral del establecimiento».

«[Maxwell es] un muchacho singular y tímido pero muy inteligente y perseverante [...], autor de algunos artículos muy prometedores en el *Edinburgh Transactions*.»

— Extracto de la carta de recomendación de Maxwell que Forbes escribió a William Whewell, rector del Trinity College.

James estaba extasiado. Cambridge era una hermosa ciudad y se respiraba tradición y cultura en cada esquina. Pero no todo iba a ser como en un cuento: en las clases también le llegaron aromas amargos de sus tiempos de escuela, deletreando «Euclides» o analizando sintácticamente una obra de teatro griega. Tampoco sus compañeros eran tan proclives a las largas discusiones que a él le apasionaban, ni a escuchar sus ideas. No se encontraba a gusto y empezó a madurar la idea de mudarse al Trinity. Por otro lado, su padre, que se había dedicado a cabildear por los pasillos de Peterhouse, empezaba a temer que su hijo no tuviera ninguna oportunidad de obtener un puesto en el *college* una vez graduado: en el campo de las matemáticas, solía salir a concurso una plaza al año y en el curso de James se encontraba Edward John Routh, que tenía bien ganada la reputación de ser un genio de las matemáticas. La única opción para su hijo era mudarse al Trinity tras el primer trimestre.

CIENCIA Y CREENCIA

La vida en el Trinity era más agradable que en Peterhouse. James hizo amigos rápidamente, sobre todo entre los estudiantes de clásicas, con los que entablaba discusiones vocingleras de todo tipo, desde filosofía y moralidad a las carreras de caballos de Newmar-

ket o, como es natural, sobre chicas. El rector del Trinity era William Whewell, un destacado investigador en filosofía e historia de la ciencia, además de poeta, traductor de Goethe y autor de sesudos sermones y tratados teológicos. No es de extrañar que bajo su dirección, el Trinity fuera un hervidero de ideas y discusiones sobre todo lo imaginable. Entre los temas que se trataban había uno que era de especial agrado para James, pues encendía sus emociones más internas: el sempiterno conflicto entre ciencia y religión.

A ambos lados del debate había quienes pensaban que se trataba de dos materias totalmente incompatibles; para James eran complementarias. Su fe era demasiado profunda e intensa como para verse sacudida por los argumentos de los ateos, pero su mente científica no permitía que las fisuras que pudieran existir entre su fe y la ciencia quedaran arrinconadas en una esquina oscura; si existían, había que explorarlas. Su posición implicaba encontrarse siempre en la cuerda floja, porque cada nuevo descubrimiento científico le obligaba a reexaminar sus creencias.

La profunda fe cristiana de James y su innegable entrega a la investigación científica le puso en muchas ocasiones en posiciones extremadamente delicadas a lo largo de su vida. Las más llamativas sucedieron cuando, siendo una estrella rutilante en el cielo de la física, recibió repetidas invitaciones para entrar a formar parte del Instituto Victoria, una organización fundada en 1865 como respuesta a la publicación de *El origen de las especies* de Darwin y entre cuyos objetivos se encontraba «defender la Verdad de las Escrituras frente a la oposición que surge, no de la ciencia, sino de la seudociencia». El Instituto dejaba muy claro lo que para sus miembros era seudociencia: todas aquellas teorías científicas que contradecían una interpretación literal de la Biblia «deben ser mera seudociencia, esto es, una falsa interpretación de la naturaleza». En marzo de 1875, Maxwell recibió una invitación por escrito y de su respuesta solo nos queda el esbozo incompleto en el anverso de la misma:

> Pienso que las conclusiones a las que llega cada persona en su intento por armonizar su ciencia con su cristianismo no deberían verse

> como que tuviera alguna significancia salvo para él mismo, y solo durante un tiempo, y no debería recibir el sello de una sociedad. Está en la naturaleza de la ciencia, especialmente en las ramas que se están abriendo hacia regiones desconocidas, de estar continuamente en cambio.

Estas pocas líneas —en nada esclarecedoras— han planteado muchos interrogantes a los biógrafos de Maxwell. ¿Cuáles eran las razones por las que un cristiano evangélico como él se negó a entrar en el Instituto Victoria? Diversos son los motivos que se han aducido. Primero, la estrechez de miras reflejada en sus documentos fundacionales, sobre todo al adoptar una estricta interpretación literal de la Biblia. Segundo, la amplitud de ideas de la religión personal de Maxwell, que practicaba una teología tolerante producto de su niñez en una casa cuyos padres pertenecían a dos iglesias diferentes: su repetida afirmación de «no tengo nariz para detectar la herejía» deja claro que su fe era algo demasiado personal. Y, finalmente, porque Maxwell siempre dudó de expresar públicamente sus ideas en materias en las que no se consideraba un experto.

Cuestión aparte merecía el divertimento más popular de aquella época, el espiritismo. Nacido en Hydesville, un pequeño villorrio del norte del estado de Nueva York, de la mano de dos niñas, las hermanas Katie y Maggie Fox, el contacto con los muertos a través de preguntas y golpes en las paredes comenzó el 31 de marzo de 1848. Cuatro años más tarde, en 1852, contaba con cerca de 750 000 seguidores, un 3% de la población.

Los británicos conocieron las maravillas del espiritismo a través de una médium norteamericana llamada W.R. Hayden, esposa de un antiguo propietario de un periódico de Nueva Inglaterra. Llegada a Londres en 1852, por una guinea podían escuchar los consabidos golpes en diferentes lugares de la habitación. Hayden era una avezada conocedora de la lectura en frío, una técnica por la cual el médium es capaz de «pescar» información o saber si su predicción va por buen camino gracias a esas pequeñas reacciones que el cliente tiene cuando se sorprende ante el «acierto». De esta forma pensó George Henry Lewes, propietario y director de

la revista *Leader*. Para demostrarlo, preparó minuciosamente una trampa. En determinados momentos, su tono de voz temblaría al nombrar ciertas letras. Los espíritus, como siempre, cooperaron gustosos con golpes sobre las letras apropiadas. Los mensajes obtenidos fueron del todo surrealistas. Según los espíritus controlados por Hayden, el fantasma del padre de Hamlet tenía diecisiete narices.

> «Creo, junto con los teólogos de Westminster y sus predecesores, que hasta el infinito "el fin principal del hombre es glorificar a Dios y gozar de Él para siempre".»
>
> — Maxwell en una carta a Lewis Campbell fechada en noviembre de 1851.

No es de extrañar que los jóvenes universitarios se interesaran por este tema, e incluso se entusiasmaran con él. Maxwell así lo hizo, pero más por diversión que otra cosa. Sin embargo, no todo eran risas; había algo que le preocupaba:

> Cada día veo más razones para creer que el estudio de las «ciencias ocultas» debería investigarse. Creo que lo que se llama la inclinación a la superstición es hoy más significativo de lo que muchos creen. La predominancia de una tendencia mal encaminada demuestra el mal camino de una tendencia predominante. Es la naturaleza y el objeto de esta tendencia lo que nos urge a su estudio.

LA VIDA EN EL TRINITY

En el *college*, James se sentía cómodo e intentaba establecer sus rutinas, algunas de las cuales eran especialmente molestas para el resto de sus compañeros. Una consistía en salir a correr media hora a las dos de la madrugada por los corredores de la residencia hasta que empezó a recibir una lluvia de cepillos, botas y otros objetos a medida que pasaba por delante de las puertas de sus compañeros. A pesar de estos «inconvenientes», su presencia era muy

apreciada en las diferentes reuniones y cenas estudiantiles. En su mayoría, declinaba tales invitaciones porque no quería que su vida de universitario se le fuera de las manos. A lo que no rehusó fue a formar parte de los Apóstoles —su nombre formal era Select Essay Club—, un grupo de doce universitarios que se consideraban el no va más de la comunidad estudiantil de Cambridge y en el que cada año escogían a nuevos miembros para reemplazar a los que se iban. Sus reuniones consistían en juntarse los sábados por la tarde, tomar té y una tostada de sardinas (que llamaban «ballenas»), tras lo cual uno de los miembros leía un ensayo acerca de cualquier materia que era discutido a continuación. Los asistentes tomaban notas manuscritas de todo lo que allí se decía, y la colección de estas se conoce hoy como «el arca», en contraposición a la práctica posterior de anotar en un diario de tapas de cuero, «el libro».

«La completa estructura de la ciencia [...] a veces parece un modelo minucioso de la naturaleza, y otras veces algo que ha crecido de forma natural en el interior de la mente humana.»

— Apreciación de Maxwell en la que muestra su postura de que las leyes de la naturaleza no son independientes de la mente humana.

Los Apóstoles eran realmente un grupo elitista: a él pertenecieron figuras tan deslumbrantes como el poeta inglés Alfred Tennyson (1809-1892), el filósofo británico Bertrand Russell (1872-1970) y el filósofo austriaco Ludwig Wittgenstein (1889-1951), el economista británico John Maynard Keynes (1883-1946) o el matemático también británico Godfrey Harold Hardy (1877-1947). En realidad, se trataba de un grupo de discusión en el que importaba más la forma que el fondo, y representaba una gran oportunidad para practicar oratoria y retórica.

En los Apóstoles, Maxwell tuvo la oportunidad de presentar sus ideas sobre la ciencia, como la necesidad de que tanto la teoría como los datos empíricos eran necesarios para entender el mundo. El ensayo que preparó en febrero de 1856 sobre el uso de las analogías en la investigación científica —«¿Hay verdaderas analogías en la naturaleza?»—, incidía en un tema que le había

tenido interesado desde las clases de filosofía de Hamilton: ¿se encuentran las analogías en el mundo real o son un producto de la mente humana?

Su ensayo para los Apóstoles concluía así:

> Las únicas leyes de la materia son aquellas que nuestras mentes pueden inventar, y las únicas leyes de la mente son inventadas para ello por la materia.

El interés por la filosofía de la investigación científica no era la única actividad intelectual que atraía a Maxwell. También se dedicó a escribir docenas de poemas de todo tipo: desde traducciones de odas épicas del latín y el griego hasta versos plagados de fina ironía buscando las risas de sus amigos. Incluso se cuenta que, solo por diversión y como venganza porque el Trinity no permitía la presencia de perros en las habitaciones, usó sus dotes de persuasión para convencer a los compañeros que tenían gatos para que descubrieran la altura mínima a partir de la cual sus queridos animales de compañía empezaban a caer de pie.

Con el paso del tiempo, la historia se fue engrandeciendo, con gatos lanzados por las ventanas del *college* en un cruel experimento científico. Bastantes años más tarde, Maxwell regresó a Cambridge y la historia no solo seguía ahí, sino que se había convertido en algo truculento y tuvo que negar haber sido tan inhumano.

De todos modos, cuando James no estaba lanzando gatos solía regalar gran parte de su tiempo a los demás. Si algún compañero necesitaba su ayuda, o simplemente se encontraba enfermo y demandaba cuidados, ahí estaba él. Animaba a los que estaban deprimidos, ayudaba a los novatos que tenían problemas con sus estudios, leía en voz alta sus notas de clase todas las tardes y, además, sacaba tiempo para escribir a su padre, a su tía Jane y a otros amigos.

Semejante hiperactividad tiene a veces sus consecuencias: durante un verano que pasó en Suffolk visitando la familia de un amigo, sufrió unas terribles fiebres que le hicieron delirar durante dos semanas.

FARADAY Y EL ESPIRITISMO



Imagen de una sesión con mesa giratoria, una práctica muy extendida en la época de Michael Faraday.

En el verano de 1854, el físico y químico británico Michael Faraday (1791-1867) realizó el que sería el estudio más influyente de cuantos se hicieron sobre el espiritismo, en particular sobre el fenómeno de las mesas giratorias, que giraban, levitaban, se movían o se inclinaban para responder mediante golpes a las preguntas de los asistentes. A sus sesenta años y con una reputación mundial indudable, la figura que había dominado durante casi cuarenta años la Royal Institution decidió comprobar qué había de cierto tras tan apasionante fenómeno. No podía negarse que si la fuerza espiritual existía y era capaz de realizar las proezas que tantos relataban, su control y desarrollo dejaría inservibles las máquinas de vapor. Faraday era un hombre profundamente religioso, por lo que se podía esperar que viera el espiritismo con buenos ojos. Sin embargo, de su correspondencia privada se deduce que le parecía un renacimiento del pensamiento supersticioso. Como impecable experimentador que era, diseñó una serie de inteligentes experimentos para determinar, primero, la realidad del fenómeno, y segundo,

MATHEMATICAL TRIPOS

Forbes, el mentor de Maxwell, tenía muy claro que el genio de James requería de una formación matemática disciplinada y sistemática. De la misma opinión era el matemático William Hopkins, su preparador para el durísimo examen de grado de la universidad, el Mathematical Tripos, «la gloria del Cambridge victoriano». Incluso los estudiantes de clásicas debían pasar el examen si querían obtener el título de licenciado.

Este extenuante examen se realizaba un enero después de tres años y un trimestre en la universidad. En 1854, el año en que

el origen del mismo. Contactó con «personas honradas y exitosas movedoras de mesas» y descubrió que podía observar su movimiento contando con una única persona. Lo primero que hizo fue establecer los controles necesarios para descartar una explicación electromagnética al fenómeno. En sus propias palabras:

> Ningún tipo de experimento o modo de observación que pudiera desarrollar me dio la más leve indicación de cualquier fuerza peculiar. Sin atracciones o repulsiones... nada de lo que pudiera atribuirse a otra cosa que no fuera una presión mecánica ejercida de manera inconsciente por el sujeto.

Sin embargo, el supuesto dotado insistía que no era él quien empujaba la mesa. Para comprobarlo, Faraday diseñó un par de ingeniosos aparatos mediante los cuales cualquier movimiento involuntario de las manos quedaría perfectamente registrado. Faraday concluyó:

> Aunque creo que los asistentes no se proponen mover la mesa, obtienen ese resultado por una acción cuasi voluntaria —sigo sin dudar de la influencia de la esperanza en sus mentes, y gracias a ello es el éxito o el fracaso de sus esfuerzos—.

Las investigaciones de Faraday, publicadas en una carta al *The Times* el 30 de junio de 1854 y dos días después con mayor detalle en la revista *Athenaeum*, convencieron a muchos científicos. Detalladas y minuciosas, como cabía esperar en un hombre de su valía, su publicación provocó un descenso en el ritmo de expansión del espiritismo en Inglaterra. Quienes no se convencieron fueron los espiritistas.

se presentó Maxwell, el Tripos consistió en 221 preguntas repartidas en 16 páginas de examen. Cada jornada se entregaban dos hojas hasta cumplir los ocho días que duraba el examen. De este modo, los aspirantes al Tripos se examinaban durante 44 horas y media. Después, los alumnos con mejores notas se presentaban a un segundo examen, el Smith's Prize, instaurado por el físico y teórico de la música Robert Smith, que consistía en tres días adicionales con 63 preguntas sobre ciencia, esencialmente física. El nivel de ambas pruebas era particularmente elevado y la dificultad crecía a medida que progresaba el examen, sobre todo en el Smith's Prize. Podemos hacernos una idea mencionando que

en 1854 una de las cuestiones del examen tenía que ver con un resultado obtenido ese mismo año sobre geometría diferencial: el teorema de Stokes.

«Todas las ciencias matemáticas se basan en las relaciones entre las leyes físicas y las leyes de los números.»

— James Clerk Maxwell.

En los primeros años del siglo XIX, una brecha dividía las matemáticas de Inglaterra de las del continente europeo. La sombra del gran Isaac Newton (1643-1727) era alargada y sus técnicas matemáticas dominaban el panorama académico. Su método de las fluxiones (estructurado y justificado por Colin MacLaurin en su *A Treatise of Fluxions* [1742]) y la geometría de sus celebérrimos *Principia* eran más un ancla que una vela para la investigación. Por el contrario, las matemáticas del continente estaban basadas en el cálculo diferencial de Gottfried Leibniz (1646-1716) y habían sido sistematizadas por figuras del calibre de Daniel Bernoulli (1700-1782) y Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), una forma de entender las matemáticas mucho más analítica que usaba herramientas como las ecuaciones en derivadas parciales, algo que aborrecían en las islas. En las universidades escocesas y en Cambridge, lo que primaba era la geometría y la interpretación geométrica de los fundamentos del cálculo: el estudio de los *Elementos de geometría* de Euclides era obligado para todos los estudiantes. Cuando en marzo de 1852 Maxwell tuvo que enfrentarse al Cambridge Previous Examination —el examen que se hacía a todos los estudiantes el año previo a la graduación—, entre los textos de estudio obligatorio estaban los libros primero y segundo de los *Elementos* de Euclides.

Un primer intento de introducir las matemáticas del continente en Cambridge y de romper con los viejos moldes lo dio Robert Woodhouse (1773-1827) en su *Principles of Analytical Calculation* (1803): no tuvo éxito. Pero al fundarse en 1812 la Analytical Society por el padre de los ordenadores Charles Babbage, el astrónomo John William Herschel (1792-1871) y el

matemático George Peacock (1791-1858), los vientos de cambio empezaron a soplar contra el statu quo de las matemáticas inglesas. Desde esta sociedad se defendía que la demostración de proposiciones y teoremas debía dejar a un lado el uso de complicadas ilustraciones geométricas —tal y como había hecho Newton en sus *Principia*— y sustituirse por la teoría de las derivadas de Lagrange. En definitiva, se pedía abandonar una manera de trabajar visual por otra más abstracta.

Este esfuerzo se vio recompensado y en la década de 1820 la teoría de Lagrange aparecía en el currículo de matemáticas de Cambridge junto a las de Newton. Pero la victoria se haría esperar: en la década de 1850, la primera parte del Tripos, dedicada a los asuntos más elementales de las matemáticas, incluía «la primera, segunda y tercera secciones de los *Principia* de Newton; las proposiciones deben demostrarse a la manera de Newton». Por su parte, Maxwell dejaba clara su postura:

> El objetivo de Lagrange es poner la dinámica bajo la potencia del cálculo... El nuestro, por otro lado, es cultivar nuestras ideas dinámicas. Por eso nos aprovecharemos del trabajo de los matemáticos y traduciremos sus resultados del lenguaje del cálculo al lenguaje de la dinámica, por lo que nuestras palabras las podemos llamar imágenes mentales, no de algún proceso algebraico, sino de alguna propiedad de los cuerpos en movimiento.

Aquí queda meridianamente expuesta la diferencia insalvable que se estaba abriendo en Gran Bretaña entre los físicos y los matemáticos: a pesar de que los científicos británicos adoptaban poco a poco los métodos analíticos del otro lado del canal de la Mancha, siguieron sin estar interesados en las matemáticas: continuaban pensando en términos geométricos y exigían una legitimación geométrica del cálculo. Todo esto sucedía mientras Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) revolucionaba las matemáticas francesas al publicar en 1821 su *Cours d'Analyse*, con el que, en palabras del historiador de las matemáticas J.V. Grabiner, «enseñó análisis riguroso a toda Europa». En Inglaterra encontró el mismo eco que Lagrange veinte años atrás: ninguno. Los matemáticos de

Cambridge reflejaban de este modo el sempiterno conservadurismo inglés. Las notas de William Hopkins sobre cálculo diferencial e integral que copiara Maxwell para preparar el Tripos reflejan que, dos décadas más tarde, el trabajo de Cauchy aún no había permeado en la universidad inglesa.

La parte más importante del Tripos era el estudio de las llamadas «matemáticas mixtas», que incluían mecánica, hidrodinámica, astronomía, gravitación y óptica física y geométrica. En la década de 1830, William Whewell (1794-1866) había conseguido introducir más temas relacionados con la física, como la teoría ondulatoria de la luz, la incipiente termodinámica, la electricidad y el magnetismo, pero esos tintes reformistas no iban a durar mucho.

NO APTO PARA CARDÍACOS



Celebración de la lectura de los resultados del Mathematical Tripos en la Universidad de Cambridge en junio de 2005.

Triunfar en el Mathematical Tripos exigía ser capaz de resolver los problemas empleando el menor tiempo posible; empezar por un camino que llevase a una vía muerta significaba perder un tiempo del que no se disponía. La única manera de superarlo pasaba por una concienzuda preparación en los tres años anteriores. La resolución continua del tipo de problemas característico del Tripos era la mejor técnica para identificar cuál debía ser el camino a seguir para resolverlo con éxito. Nunca se revelaba la puntuación total obtenida por los estudiantes; lo que aparecía era un listado de nombres ordenado de mayor a menor en tres grupos: Wranglers, Senior Optimes y Junior Optimes. Conseguir la primera posición como Senior Wrangler estaba considerado como la hazaña intelectual más importante de toda Gran Bretaña, al igual que quedar en segunda y tercera posición (Second y Third Wrangler). Las notas reales nunca han sido publicadas, pero el psicólogo Francis Galton, en su libro *Hereditary Genius* (1869), afirmó haber obtenido las correspondientes a tres años, sin especificar cuáles. En uno de esos años, de los 17000 puntos totales, el Senior Wrangler obtuvo 7634, el segundo

En la década siguiente, el enfoque analítico que había ido permeando fue temperado por una vuelta a la geometría y las ramas más tradicionales de la física matemática: en 1849, el Board of Mathematical Studies recomendaba que «la electricidad, el magnetismo y el calor no sean admitidas como materias de examen».

El Tripos exigía resolver los problemas propuestos rápidamente, y los examinadores los planteaban así ex profeso. Era algo muy parecido a los crucigramas: el novato puede dedicarle mucho tiempo a resolverlos, pero un experto puede hacerlo con rapidez, pues ya conoce las argucias y estratagemas que se esconden detrás. El Tripos era algo parecido: el estudiante que quería triunfar debía buscar la guía de un verdadero conocedor del oficio. En el

Wrangler 4123 y el último de este grupo alrededor de 1500. La nota más baja, el último de la lista de los Junior Optime, fue de 237 puntos. En general, puede afirmarse que el mejor de todos los examinandos obtenía una puntuación inferior al 50% de la mayor nota posible, y el de peor nota, menos del 2%. Este hecho ha dado munición a los críticos para decir que el nivel contenido en la prueba estaba muy por encima de las capacidades de los mejores candidatos. Otros señalan que este examen no premia la originalidad de pensamiento, sino el automatismo para resolver los problemas «estilo Tripos».

Una anécdota

Existe un relato muy llamativo que parece confirmar este extremo. En 1845, William Thomson era, sin duda, el matemático más original y brillante de entonces, y pensaba que era un «tiro hecho» ser el Senior Wrangler de ese año. El día que publicaron las listas con los resultados del examen le dijo a uno de los criados de Peterhouse:

— Ve al Senate House y mira quién es el segundo Wrangler.
Cuando regresó el sirviente, le dijo:
— Usted, señor.

Thomson había sido batido por Stephen Parkinson, un gran matemático pero carente de toda originalidad. De hecho, no produjo nada relevante en su carrera posterior, donde solo destaca un libro de texto de matemáticas. Eso sí, había cultivado a la perfección las pericias necesarias para resolver los problemas del Mathematical Tripos en tiempo récord.

caso del Tripos, había una persona que había adquirido el sobrenombre de «hacedor de Senior Wrangler»: el matemático William Hopkins.

Su habilidad enseñando cómo superar el Tripos era tan buena que ganaba anualmente 800 libras con sus clases preparatorias. Hopkins vio de inmediato el potencial de James, pero quedó conmocionado por su «estado de desorden» y dedicó más tiempo a enseñarle metodología de trabajo que en transmitirle conocimientos. Por su parte, James decidió que no solo se conformaría con aprender los trucos clásicos para resolver los acertijos del Tripos, sino que siempre que fuera posible intentaría hacerse una idea de lo que el problema significaba. Un día, Hopkins llenó toda una pizarra con la resolución de un problema y James lo hizo en pocas líneas y con ayuda de un diagrama. Eso sí, su tendencia a cometer errores algebraicos no desapareció.

Uno de los compañeros de Maxwell en las clases de Hopkins, W.N. Lawson, escribió de él:

> Recuerdo que me quedaba trabajando toda la noche y toda la mañana siguiente en los problemas que nos había puesto Hopkins, con poco y ningún éxito. Maxwell podía venir para cotillear y se quedaba hablando y lo único que yo quería era que se fuera. Al final, una hora y media antes de ir a clase de Hopkins, decía: «Bueno, debo resolver los viejos problemas de Hop». Y cuando llegábamos, los tenía resueltos.

El examen llegó. Los ocho días eran una prueba de fuego para las mentes de los estudiantes, por lo que se imponía algún tipo de actividad relajante para las tardes. No es que charlar y leer fuera algo atractivo en aquellos momentos, pero sí lo era fijar la cabeza en trabajo de laboratorio. Así que todas aquellas tardes Maxwell vio cómo acudían a su cuarto estudiantes para ayudarle en sus experimentos con imanes. Al final, todo termina, incuso el Tripos. Ya solo faltaba esperar la lista con las posiciones: James quedó segundo Wrangler, detrás de su compañero en las clases de Hopkins, Edward John Routh, que después sería un renombrado preparador del Tripos. Su padre le escribió desde Edimburgo:

> De todo corazón te felicito por tu puesto en la lista. Supongo que es más alto que lo que esperaban de ti, y tan alto como esperaba Hopkins. Te deseo suerte en el Smith's Prize; asegúrate de escribirme con el resultado.

A los pocos días, Maxwell y Routh se enfrentaban al Smith's Prize. A las dos de la mañana del 6 de febrero George Wedderburn entró como una exhalación en la habitación de Maxwell. Había leído el *Saturday Times* en el expreso y le comunicó la noticia: había empatado con Routh. Semejante éxito le iba a abrir muchas puertas, pero Maxwell tenía sus propias ideas: se quedaría en el Trinity como graduado y luego optaría a una plaza de *fellow*. Después de unos años, buscaría un puesto de profesor en alguna universidad, pues ser miembro permanente del claustro del Trinity requería ser ordenado sacerdote de la Iglesia de Inglaterra y permanecer soltero, algo que no entraba en los planes de futuro de James.

> «Para este hombre es prácticamente imposible que piense de manera incorrecta en cuestiones físicas; sin embargo, en análisis es mucho más deficiente.»
>
> — William Hopkins sobre Maxwell.

Mientras, la vida seguía su curso. Su rutina diaria incluía andar, remar por el río Cam, nadar, hacer ejercicio en el gimnasio... Al mismo tiempo, su nueva posición de graduado le imponía otras obligaciones, como la de tomar alumnos, y pronto debería presentarse a otro examen para obtener la plaza en el Trinity.

Los cuatro años de estudiante en Cambridge le proporcionaron el bagaje necesario para redirigir los proyectos de investigación que había empezado en Edimburgo. Al igual que hiciera Forbes en el caso de la ciencia experimental, Hopkins le había enseñado esa disciplina mental que necesitaba en matemáticas. Así que empezó a dirigir su atención a una pregunta que se hizo cuando tenía tres años: ¿Cómo sé que el color azul es azul?

CAPÍTULO 4

El color del cristal con que se mira

Maxwell había superado con éxito su paso por Cambridge y veía que ya era hora de retomar sus investigaciones. Su estancia en la universidad le había dado serenidad, claridad de ideas y metodología, y ya estaba dispuesto a aplicarlas a los retos que tenía pendientes. De esta época data una de sus contribuciones científicas más interesantes y no por ello bien conocida: su teoría de clasificación de los colores. Con ella se labró una excelente reputación de físico experimental con una buena base matemática.

A mediados del siglo XVII, un joven científico inglés quiso averiguar por qué vemos las hojas de los árboles verdes, el cielo azul y el algodón blanco. Para ello, miraba directamente al Sol hasta que los colores cambiaban ante sus ojos. Le puso tanta dedicación que se tuvo que encerrar durante varios días en su habitación, totalmente a oscuras, hasta dejar de ver miríadas de puntitos luminosos que flotaban permanentemente ante sus ojos. Este «inconsciente» investigador era el gran Isaac Newton.

Años más tarde volvió a la carga, esta vez con algo más de precaución. Entonces, la teoría en boga en el círculo académico era que los colores eran una mezcla de luz y oscuridad. Había incluso una escala, que iba del rojo brillante, pura luz blanca con una cantidad mínima de oscuridad, hasta el azul apagado, paso previo al negro, que era la completa desaparición de la luz en la total oscuridad. A Newton no le convencía esta explicación: si se escribe con tinta negra sobre un papel blanco, la escritura no aparece coloreada...

Newton comenzó a experimentar lo que se conocía como «el celebrado fenómeno de los colores». Los científicos utilizaban el prisma para sus trabajos y pensaban que había algo en él que era el culpable de la coloración de la luz. El problema radicaba en que colocaban la pantalla sobre la que incidía la luz que salía del prisma muy cerca de él, de manera que solo veían una mancha de colo-



Con este diagrama Isaac Newton quiso establecer una teoría de la mezcla de los colores, donde a partir de los colores espectrales pudiera generarse cualquier otro.

res. Newton se dio cuenta de que la clave estaba en separar la pantalla todo lo que pudiera del prisma... y surgió el arcoíris. Pero aún debía hacer un experimento crucial. A la pantalla donde llegaba la luz descompuesta en colores le hizo una pequeña rendija justo a la altura a la que llegaba el haz verde, y detrás puso otro prisma. Newton comprobó que la luz que emergía de este segundo prisma no se descomponía, sino que seguía siendo verde. Acababa de demostrar que la luz blanca no era otra cosa que una mezcla de colores y el prisma únicamente los separaba. Ahora su siguiente paso era averiguar cuáles eran las reglas que gobernaban la mezcla de colores. Para ello, Newton ideó lo que se conoce hoy en día como el círculo de color de Newton (véase la figura).

La circunferencia la dividió en arcos proporcionales al tamaño que en el arcoíris tienen las bandas de los siete colores espectrales. La circunferencia representa los tonos saturados de cada uno, mientras que el centro del círculo, *O*, representa la mezcla de los colores espectrales, como sucede en la luz blanca del Sol. De este modo, la distancia entre *O* y la circunferencia representa la gama de colores no saturados, apagados, que observamos en el mundo real. Newton acababa de establecer un método geométrico para calcular la cromaticidad (esto es, el tono y la pureza) de un color dado.

Como puede verse en el ejemplo de la figura de esta página, en el centro de cada arco Newton colocó un pequeño círculo cuyo tamaño (o peso) era proporcional al número de rayos de ese color particular que entran a formar parte de una mezcla determinada y el punto *Z* representa el centro de gravedad común de todos los círculos pequeños e indica cuál es el color que se ha compuesto a partir de esa mezcla de los colores espectrales; en este caso un rojo anaranjado.

Para cerrar su razonamiento, Newton observó que:

> Si el punto *Z* cayera en, o cerca de la línea *OD*, los principales ingredientes serían rojo y violeta, y el color compuesto no sería ninguno de los colores prismáticos [los que aparecen al atravesar un prisma un rayo de luz], sino un púrpura que tiende al rojo o violeta; por consiguiente, el punto *Z* se encontraría en el lado de la línea *DO* hacia *E* o hacia *C*, y en general el violeta compuesto es más brillante y más encendido [saturado] que el no compuesto.

«La ciencia del color debe ser considerada, en esencia, como una ciencia de la mente.»

— James Clerk Maxwell.

Sin embargo, Newton conocía las limitaciones de su construcción: había un incómodo punto de discontinuidad en el lugar donde se encontraban los dos colores de los extremos del espectro, el rojo y el violeta. Además, ¿qué sucedía si mezclaba a partes iguales dos colores que se encontraran diametralmente opuestos en el círculo? En puridad, caería en el centro (*O*) y debía obtenerse el color blanco pero, como el mismo Newton reconoció, «no sería un blanco perfecto, sino algún color débil y anónimo [diluido e innombrable]». También admitió no haber conseguido producir el blanco a partir de dos colores, a pesar de que el físico holandés Christiaan Huygens (1629-1695) afirmaba que podía hacerse mezclando luz azul y amarilla. Eso sí, aceptaba la posibilidad de que pudiera hacerse con «una mezcla de tres colores tomados a distancias iguales de la circunferencia». No obstante, tuvo cuidado en diferenciar entre el blanco que se producía al mezclar algunos de los siete colores del arcoíris, del «blanco de la luz inmediata del Sol»: a su juicio, se trataba de dos blancos diferentes.

Newton cometió diversos errores en su teoría del color que se mantuvieron con el tiempo por obra y gracia de su tremendo prestigio. Como a la hora de explicar sus experimentos no diferenció claramente entre la luz y los pigmentos, los científicos posteriores supusieron que mezclar luz o pigmentos era lo mismo.

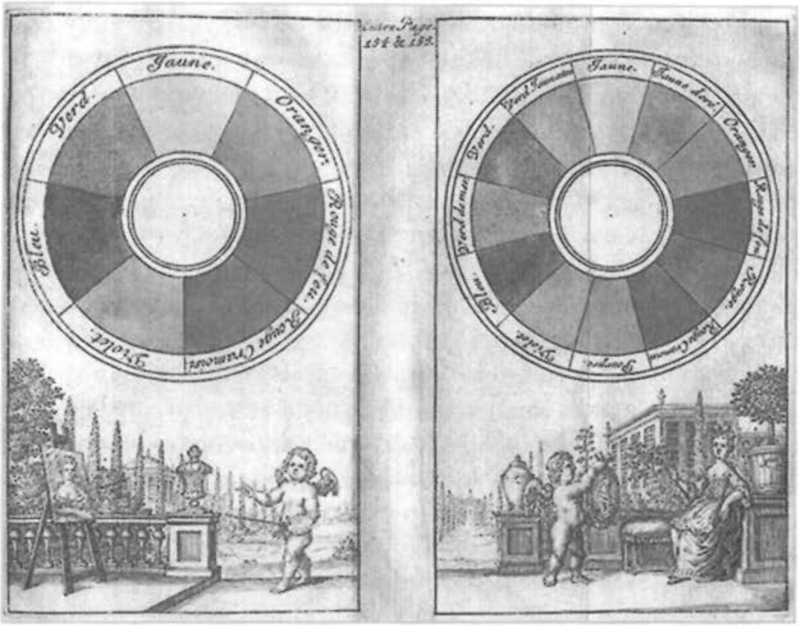
También dio por sentado que el color de un pigmento era equivalente al color de la luz que refleja (esto es, que un pigmento amarillo refleja luz amarilla, una equivocación que aún perdura). En la época de Maxwell, la teoría de Newton seguía siendo la mejor disponible.

UNA PEONZA COLOREADA

Mientras tanto, los artistas y las empresas textiles estaban a años luz de distancia de los científicos en la comprensión de la mezcla de colores. Desde el siglo XVII, sabían perfectamente cómo generar el color que querían a partir del rojo, el azul y el amarillo, la tríada de colores «primarios». Pero, ¿por qué tres? El físico y médico inglés Thomas Young (1773-1829) razonó en su *Course of Lectures on Natural Philosophy* (1807) que podía haber una causa fisiológica en todo ello. Quizá en el ojo teníamos «tres tipos de sensaciones en la retina», diferentes receptores, y la mezcla de sus señales en el cerebro daba lugar al color percibido.

> «El color que percibimos es una función de tres variables independientes, por lo menos son tres las que yo creo suficientes, pero el tiempo dirá si prosperan.»
>
> — MAXWELL, EN UNA CARTA A WILLIAM THOMSON.

James había empezado a interesarse por el problema de los colores desde sus días en el laboratorio de Forbes en Edimburgo. Su mentor pensaba que podía generarse cualquier color usando la clásica rueda de colores (véase la figura) convenientemente modificada. Como al ponerse a girar con rapidez, nuestro ojo es incapaz de resolver cada uno de los colores pintados en la rueda, lo que acabamos viendo es una mezcla de todos ellos. Esta es una característica del ojo, pero no del oído: al poder separar los sonidos en sus componentes más simples, somos capaces de escuchar una melodía y no una mezcla única de todas las notas.



La primera rueda de color que muestra las relaciones existentes entre los primarios, secudarios, complementarios... es obra de Isaac Newton. Aquí reproducimos dos que aparecen en el *Traité de la Peinture en Mignature* (1708), atribuido al francés Claude Boutet. A la derecha se ve el ejemplo más antiguo de la rueda de color de doce tonalidades.

Siguiendo la propuesta de Young, Forbes pensaba que podía producir cualquier color, incluyendo el blanco, colocando de manera apropiada los tres colores primarios en la rueda. De este modo, buscó obtener el blanco a partir del rojo, el amarillo y el azul, distribuyéndolos por la rueda en sectores de diferentes tamaños. Fue en vano. Intentó producir el verde a partir del azul y el amarillo, como hacían los pintores en sus paletas, pero no lo consiguió: sorprendentemente, obtenía el rosa.

Forbes estaba perplejo. Hoy sabemos que no es lo mismo mezclar luz que pigmentos: la primera es una mezcla de colores aditiva, la segunda es sustractiva: vemos el color amarillo en las paredes porque es la componente de la luz visible que no absorbe la pintura. Esto es lo que encontró Maxwell: descubrió que jugando con una rueda de colores que contenía el rojo, el verde y el azul como primarios, todo funcionaba a la perfección.

James Clerk Maxwell comenzó su investigación de los colores en el momento oportuno, cuando había un gran interés por

ellos. El físico óptico escocés David Brewster (1781-1868) acababa de formular una teoría sobre la sensación de color, y el alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) había publicado en 1852 su primer artículo sobre el tema. Según Brewster, los tres colores primarios eran el rojo, el azul y el amarillo, y correspondían —siguiendo a Young— a tres tipos de luz objetiva. Pero Von Helmholtz señalaba una inconsistencia de fondo: los experimentos realizados hasta la fecha se habían llevado a cabo mezclando pigmentos, con excepción de aquellos pocos hechos con la rueda de colores, y era necesario mezclar luz de diferentes colores para poder comparar resultados. Para ello, Von Helmholtz construyó un dispositivo, una caja capaz de mezclar la luz de dos colores espectrales que podía mezclar con cualquier valor de intensidad. De estos experimentos había obtenido unos resultados sorprendentes, pues de la mezcla de rojo y verde había obtenido amarillo, y del verde y el violeta había obtenido azul.

Maxwell tomó nota de las consideraciones del alemán y construyó su propia caja de color en 1852. Pero antes de eso debía realizar sus propias investigaciones con la rueda de colores.

GIRA, GIRA, RUEDECITA

Lo primero que había que hacer era obtener medidas cuantitativas de la mezcla de colores. Para ello, Maxwell modificó la rueda de manera que pudiera escoger la cantidad de cada color que iba a utilizar, que medía gracias a un círculo graduado. En sus experimentos encontró que con blanco, negro, rojo, verde, amarillo y azul podía obtener cualquier color. Pero había que afinar más los resultados e incluyó una segunda rueda más pequeña, que colocó encima de la primera. De este modo, en la inferior ponía tres colores, digamos negro, amarillo y azul, y en la superior, el rojo y el verde. Para cuantificar la proporción de cada color que había en ambas ruedas solo tenía que mirar la escala que llevaban impresa. ¿Podía generar el mismo color en ambas ruedas? Así fue. En uno de sus experimentos encontró que obtenía el

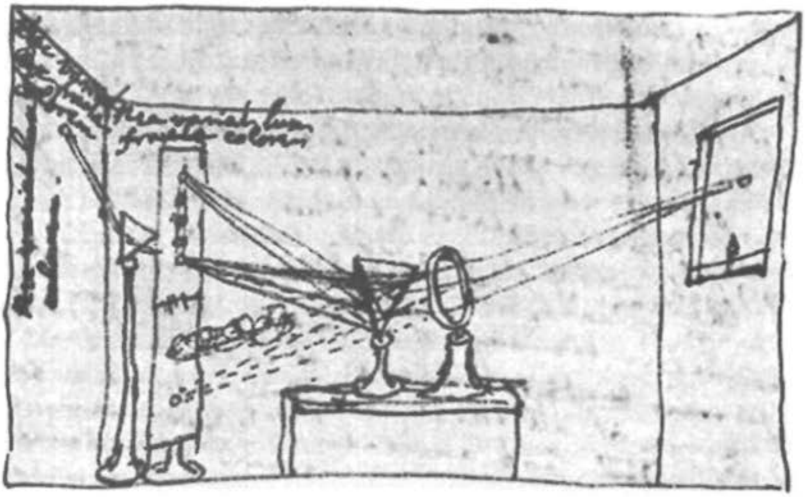




FOTO SUPERIOR:
Un bosquejo de Newton de uno de sus experimentos con los colores. Entre las aportaciones a la ciencia del físico y matemático inglés, encontramos la teoría de los colores y las primeras ideas sobre la atracción gravitatoria.

FOTO INFERIOR:
James Clerk Maxwell a los veintitrés años, sosteniendo una rueda de color en el Trinity College de Cambridge. Maxwell se basó en la teoría del color de Newton y fue el primer científico en ofrecer una teoría cuantitativa del color, que le valió el reconocimiento de sus colegas.

mismo color, un amarillo sucio, con 46,8 partes de negro, 29,1 de amarillo y 24,1 de azul, y con 66,6 partes de rojo y 33,4 partes de verde. Ahora bien, el negro no es un color: Maxwell lo incluyó para controlar el brillo y la tonalidad de la mezcla de azul y amarillo. Luego, lo que realmente tenía es que 29,1 partes de amarillo y 24,1 de azul producen el mismo color que 66,6 partes de rojo y 33,4 de verde. Llamando A, B, C y D a los colores y a, b, c y d a las cantidades de cada color, podemos generalizar este resultado diciendo que:

$$cC + dD = aA + bB,$$

donde el símbolo + significa «combinado con» y el símbolo = «coincide en tinta». Del mismo modo, podemos decir que:

$$dD = aA + bB - cC.$$

En este caso, el símbolo – indica que para igualar los colores debemos combinar el C con el D, y entonces coincide con una mezcla de A y B. Por tanto, se podía afirmar que, para un color cualquiera X, existía una mezcla de tres colores tal que:

$$xX = aA + bB + cC.$$

Si el signo de alguna de las cantidades a, b o c era negativo, quería decir que ese color debía combinarse con X para coincidir en tinta con una mezcla de los otros dos. Solo bastaba con escoger adecuadamente esos colores primarios. ¿O no? En enero de 1855, Maxwell escribió:

> No es necesario especificar ningún color como típico de estas sensaciones. Young ha escogido el rojo, el verde y el violeta, pero podía escogerse cualquier otro grupo de tres colores, que proporcionarán el blanco si se combinan apropiadamente.

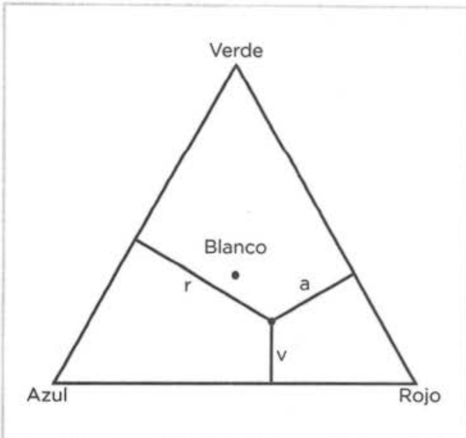
Young había incluido en su teoría un triángulo de color en el que mostraba que todos los colores, incluso el blanco, se podían

generar a partir de sus primarios: rojo, verde y violeta. A esta ruptura con la tríada de los pintores, en 1849 Forbes la había tildado como «una opinión singular». Aquel mes de enero, Maxwell había adoptado el planteamiento de Young, pero enfatizando que el punto crucial en la selección de los primarios era su combinación, en las debidas proporciones, para formar el blanco. Gracias a sus experimentos, se sentía preparado para formular una teoría de la clasificación de los colores. Para ello, partió de la propuesta por el alemán Hermann Grassmann (1809-1877) en su artículo «Sobre la teoría de la mezcla de los colores» *(«Über die Theorie der Farbenmischung»)*, publicado en 1853, en el que decía que había tres variables en la visión de los colores: tono o color espectral, brillo o intensidad del color y brillo del blanco. A partir de ellas, introdujo dos cantidades derivadas, el brillo total, que es la suma de los brillos del color y del blanco; y el grado de saturación, la razón del brillo del color sobre el total. Grassmann demostró que cada color podía representarse mediante su posición y un determinado «peso» en el círculo cromático de Newton, de modo que, por ejemplo, el producto del brillo total por la distancia al centro daba como resultado la intensidad del color.

Con todo este bagaje, Maxwell mostró que estas variables se podían representar en un diagrama que incorporaba el esquema triangular de Young, el círculo de color de Newton y la clasificación de los colores de Grassmann. Su representación geométrica del color se conoce como el «triángulo de Maxwell».

UN TRIÁNGULO DE COLOR

Los tres colores primarios, rojo, verde y azul (en realidad eran bermellón, verde esmeralda y azul ultramar), están representados por los lados de un triángulo equilátero (véase la figura en la página siguiente). Cada punto del triángulo representa un color que se puede obtener por una mezcla determinada de estos tres colores y el punto central representa el color blanco. Cada punto del triángulo corresponde a una solución de la ecuación:



Un determinado color puede definirse en este triángulo por las distancias a cada uno de sus lados, como se explica en el texto. El centro geométrico del mismo corresponde al blanco.

$$\text{Color} = \%R + \%V + \%A,$$

donde $\%R$ es el porcentaje de rojo definido como $100\,r/(r+v+a)$, $\%V$ el de verde, $100\,v/(r+v+a)$ y $\%A$ el de azul, $100\,a/(r+v+a)$, donde r, v y a son las distancias a un punto del triángulo. Además, el color espectral venía dado por la posición angular de la recta al centro de gravedad, el blanco, y el nivel de saturación por la distancia al mismo.

No obstante, Maxwell era consciente de que no todos los colores podían generarse como una combinación de esos tres primarios: en su representación geométrica había algunos que se encontraban fuera de los límites del triángulo. ¿Cuáles? Aquellos que, como hemos visto, aparecían al restar un primario, o lo que es lo mismo, los que tenían un valor de a, v o r negativo.

El sistema de Maxwell era robusto, pues no dependía de la elección de los colores primarios, pero James encontró que su personal elección de esos colores era muy cercana a la tríada ideal, dado que la inmensa mayoría de los colores caían dentro del triángulo.

Podemos resumir la contribución original de Maxwell en una síntesis (geométrica) de la teoría del color que publicó en 1855 en la revista de la Royal Society de Edimburgo bajo el título «Experiments on Colour, As Perceived by the Eye». En la actualidad, todos comprobamos diariamente la potencia de la teoría de los tres componentes del color cada vez que encendemos el televisor.

Ahora bien, y como él mismo explicó en una carta a Forbes en noviembre de 1857:

> Los papeles coloreados y los trompos, aunque son mucho más precisos que la mayoría de los experimentos espectrales, no proporcionan ningún hecho absoluto sobre la definición de los colores.

La razón ya la había expresado en su artículo de 1855:

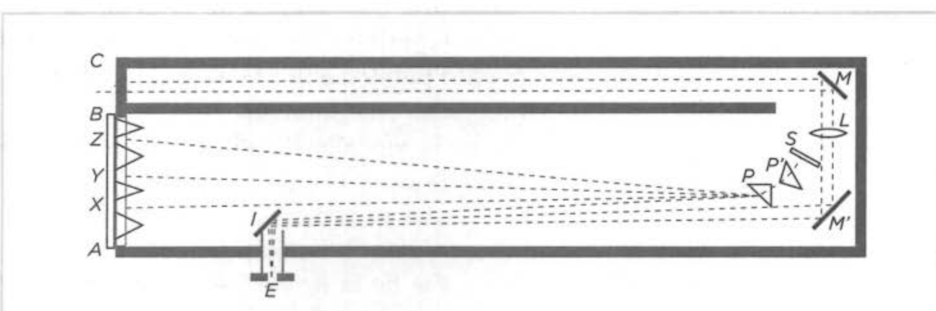
Los colores en los discos no representan de ningún modo los colores primarios, sino que son simples especímenes de diferentes tipos de pinturas.

Por tanto, las ecuaciones que encontró no eran otra cosa que relaciones «entre los colores de determinados pigmentos».

Por este motivo, en 1852 ya había diseñado —siguiendo a Von Helmholtz— su particular «caja de color» con una serie de prismas y rendijas para mezclar y comparar colores espectrales (véase la figura, abajo). En aquel momento, la mayor dificultad estaba en conseguir tomar medidas directas, y eso exigía pulir la óptica de su caja. En 1855 construyó una con la que fue capaz de observar mezclas de dos colores puros y, a partir de ella, al año siguiente ideó otra portátil «para mostrar el fenómeno, aunque sea toscamente, a otras personas».

Con su caja perfectamente calibrada y con las ideas de Grassmann, Young y Newton como marco teórico, Maxwell fue capaz de dibujar las curvas de distribución de la luminosidad de cada color estándar en función de su longitud de onda, representando el mecanismo de respuesta fisiológica del ojo. Esto le llevó a interesarse por el funcionamiento del ojo, ya fuera animal o humano. Pero no había instrumental para hacerlo, así que tuvo que construirlo: el oftalmoscopio, inventado por Von Helmholtz un año antes y del cual James no tenía idea de que existiera. Maxwell

Esquema de la «caja de color» diseñada por Maxwell con los rayos de luz trazados en línea discontinua.



dedicó mucho tiempo a mirar en el interior de los ojos de los perros y de las personas, aunque para convencer a estas últimas tuvo que dejar que ellas miraran en el interior de los suyos primero.

Con los pies asentados en suelo firme, y con la ayuda de su mujer —se casó, como veremos, en 1858—, pudo demostrar que cuando se combinaba cualquier color espectral entre el rojo y el verde, con una pequeña parte de azul, coincidía con una determinada mezcla de rojo y verde. Del mismo modo, cualquier color entre el verde y el violeta, mezclado con una pequeña cantidad de rojo, podía ajustarse a una mezcla apropiada de verde y violeta. De esta manera, pudo sustituir el círculo cromático de Newton por una curva en su triángulo. Obviamente, la forma de esta curva dependía del ojo del observador, pero Maxwell descubrió que para la mayoría de la gente los resultados obtenidos en sus ojos y los de su mujer se ajustaban bastante bien. Caso aparte era el de aquellas personas con algún tipo de discromatopsia o ceguera a algún color: si no veían el rojo, prácticamente todos los colores encajaban con una mezcla de verde y violeta. En 1860, James publicó su último gran trabajo sobre el color, donde incluyó todos estos resultados: «On the Theory of Compounds Colours».

El trabajo de Maxwell en la teoría del color había introducido medidas exquisitamente precisas y ecuaciones matemáticas, lo que agradó profundamente al *establishment* científico de la Universidad de Cambridge, especialmente a Stokes, que ocupaba la prestigiosa cátedra lucasiana de matemáticas —la que había ocupado el mismísimo Isaac Newton—, y del rector del Trinity, Whewell. En junio de 1859 lo nominaron para la Royal Medal de la Royal Society «por su teoría matemática de la composición de colores, verificada por experimentos cuantitativos», lo que constituía el reconocimiento público a la creación de una teoría matemática basada en medidas cuantitativas. Pero no se la concedieron. La que sí ganó fue la medalla Rumford (especialmente creada para estudios sobre la luz y el calor), conseguida el año siguiente, justo cuando enviaba su artículo, no a la revista de la Royal Society de Edimburgo, donde había publicado las investigaciones anteriores, sino a la de la Royal Society de Londres, a petición del propio Stokes, secretario de la sociedad. De este

modo, su trabajo sobre los colores convirtió a Maxwell en una figura en el mundo de la ciencia británica, y le dio una reputación a los ojos de sus colegas de físico experimental de Edimburgo con los valores de las matemáticas de Cambridge.

DE REGRESO A ESCOCIA

Mientras todo esto ocurría tras la puerta del laboratorio de Maxwell, al otro lado muchas otras cosas estaban sucediendo. En las vacaciones de Navidad de 1854, su padre enfermó gravemente por culpa de una infección pulmonar, de manera que James abandonó su trabajo para cuidarle. No pudo regresar a Cambridge hasta el último trimestre de curso. En una carta a su padre expresaba su alegría porque William Thomson «empezaba a creer en mi teoría de que todos los colores se pueden referenciar a tres estándar», al tiempo que se lamentaba de que en Cambridge se sentía aislado.

> «Es difícil mantener el interés en temas intelectuales cuando tus amigos del mundo intelectual escasean.»
>
> — Palabras de Maxwell en una carta a su padre refiriéndose a su estancia en Cambridge.

Maxwell superó con éxito el examen para ser *fellow* del Trinity y fue oficialmente nombrado como tal el 10 de octubre de 1855. Inmediatamente pidió dar clases de hidrostática y óptica en el *college* a los alumnos de tercer curso, al tiempo que declinó convertirse en tutor de algún alumno: quería dedicar todo su tiempo a las clases, a los alumnos y a las investigaciones. En febrero de 1856 recibió una carta de su mentor y amigo Forbes informándole de una vacante de profesor de Filosofía Natural en el Marischal College de Aberdeen, al norte de Escocia, y sugiriéndole que debería optar por ella. James decidió que se presentaría si su padre lo aprobaba. «Por mi parte —escribió— pienso que cuanto antes tenga un trabajo fijo será mejor y la mejor forma de conseguirlo

es optando por una plaza de profesor.» Su padre estaba entusiasmado por la oportunidad y empezó a cabildear por Edimburgo en apoyo de su hijo. Cuando James regresó a Escocia a mediados de marzo, todo estaba ya preparado. Ambos regresaron a Glenlair tras pasar unos días en Edimburgo cuando, el 2 de abril, su padre falleció de repente:

> Mi padre ha muerto de pronto a las doce en punto. Había estado dando instrucciones en el jardín, tras lo cual dijo que se iba a sentar un poco para descansar, como era habitual. Después de unos minutos, le dije que se tumbara en el sofá, pero no me hizo caso; entonces le llevé algo de éter, pues sabía que ya le había ayudado a mejorar en otras ocasiones. Antes de que pudiera tomarlo, dio un pequeño respingo y todo terminó.

Justo tras la muerte de su padre, Maxwell fue elegido para la plaza de profesor, a la que se incorporó en noviembre tras pasar un triste verano en Glenlair llevando a cabo los planes que para la hacienda tenía previsto hacer su padre.

Una vez instalado se llevó la primera sorpresa: con veinticinco años, era el profesor más joven del *college*, y aunque esperaba encontrarse con colegas de edad parecida, el siguiente más joven tenía cuarenta años y la media de edad rondaba los cincuenta y cinco. La segunda fue el caluroso recibimiento que le hicieron sus compañeros. De hecho, todos eran muy amigables y muy pronto se encontró cenando más veces fuera de casa que en ella. Aunque había un pero:

> Aquí nadie entiende ningún chiste. No he contado ninguno en dos meses y en cuanto noto que uno quiere salir por mi boca me tengo que morder la lengua.

El Marischal College fue la segunda universidad escocesa, fundada después de la de Edimburgo. Su titulación principal era el Master of Arts (MA) y las asignaturas obligatorias eran griego, latín, historia natural, matemáticas, filosofía natural, filosofía moral y lógica. La mayoría de los estudiantes vivían en la ciudad

o en sus alrededores y provenían fundamentalmente de familias de comerciantes, aunque también de granjeros, clérigos, maestros y abogados. Los hijos de los dos primeros no solían seguir el negocio paterno y buscaban una salida profesional como médicos, clérigos, profesores o abogados.

Como mandaba la tradición, todo nuevo profesor debía impartir una lección inaugural a la que asistía toda la comunidad universitaria en la que debía explicar cuál iba a ser la política que pensaba seguir como jefe del departamento. Maxwell se la preparó a conciencia. Dejó muy claro que no solo iba a explicar ciencia, sino que también la usaría para que sus alumnos aprendieran a pensar correctamente por sí mismos:

> Confío que gracias al estudio cuidadoso y diligente de las leyes naturales seamos capaces de huir de los peligros de las formas de pensamiento vagas e inconsistentes y adquiramos el sano hábito del pensamiento enérgico que nos permita reconocer el error en todas sus formas.

Y añadió que iba a romper con ese hábito académico de desprecio hacia la experimentación: el laboratorio iba a ser una pieza fundamental de sus clases. Por suerte, su predecesor era un entusiasta de la investigación y había dejado un laboratorio bien provisto.

Maxwell tenía muy claro qué quería hacer en sus clases, pero era necesario que lo detallara por escrito, pues debía presentar un completo plan de estudios. Sus días estaban bastante cargados de trabajo: preparar las clases y las sesiones de prácticas e impartir una vez por semana una clase en la Aberdeen Mechanics Institution, un centro que abrió sus puertas en 1824 como respuesta a las nuevas necesidades derivadas de la Revolución industrial de dar formación técnica a los trabajadores. Durante tres décadas sus predecesores se habían encargado de proporcionar conocimientos científicos a los asistentes una tarde por semana, y Maxwell estaba encantado de continuar con esa tradición. De este modo, acabó teniendo una carga lectiva semanal de quince horas, a lo que había que sumar el tiempo que debía dedicar a los

trámites administrativos y burocráticos de su departamento, la preparación de las clases... Y además quería dedicar tiempo a sus investigaciones.

James se había instalado en una ciudad única: si en toda Escocia había cinco universidades, Aberdeen tenía dos: Marischal y el King's College. Era algo inusual y se había creado una comisión para unir ambos centros. Se trataba de una tarea bastante complicada, pues existía una rivalidad malsana entre ambos: James, de naturaleza cordial, pronto se hizo amigo de los miembros más jóvenes del King's, pero enseguida se dio cuenta de que entre los profesores y sus familias de los dos *college* lo que verdaderamente existía era una glacial cortesía: nadie tenía tratos con los del «otro lado».

Así las cosas, James empezó a sentirse solo. Era un recién llegado a una sociedad que en apariencia se mostraba amigable, pero que en realidad era bastante cerrada, donde tenía que vivir durante el año académico, de noviembre a abril. En Glenlair vivía solo, atendiendo la hacienda y recibiendo las visitas ocasionales de sus amigos. Solía ir a ver a sus familiares, pero su relación con aquellas personas con las que se sentía más cercano era fundamentalmente epistolar; sus cartas de esa época muestran a un hombre emocionado con su trabajo, que valoraba en muy alto grado la amistad, pero al que le costaba manejar el dolor y la soledad.

CAPÍTULO 5

Los anillos de Saturno

En 1857, un problema absorbió prácticamente todo el tiempo libre de Maxwell, una incógnita que había estado intrigando a los astrónomos durante más de doscientos años: los anillos del gigante gaseoso Saturno. Su sistema de anillos desafiaba las leyes de la dinámica celeste y este misterio fue llevado al centro de la arena científica cuando se convirtió en tema para un premio.

En 1848, algunos miembros del St. John College de Cambridge creaban el premio Adams, para conmemorar al joven matemático que había predicho —al mismo tiempo que el francés Urbain Le Verrier (1811-1877)— la existencia de un planeta más allá de la órbita de Urano. Ambos trabajos fueron una demostración de la potencia de las leyes de la mecánica celeste: Urano sufría unas incomprensibles desviaciones en su órbita. La explicación más razonable era suponer la existencia de un planeta situado más allá que tirase gravitacionalmente de él.

Neptuno se descubrió oficialmente en 1846 porque un astrónomo del observatorio de Berlín hizo caso a una carta que le había enviado Le Verrier, pidiéndole que apuntara su telescopio a las coordenadas que le indicaba. Y allí lo encontró. Independientemente, a mediados de septiembre de 1845, un joven y brillante matemático llamado John Couch Adams (1819-1892), que se había graduado dos años antes, completó sus cálculos para determinar dónde se podía encontrar el misterioso planeta. Que el crédito de su descubrimiento fuera a manos de un astrónomo francés dejando fuera a un hombre de Cambridge no era algo que debía quedar sin respuesta. Y mucho menos que el galardón más prestigioso de la Royal Society —y el primer honor científico del mundo—, la medalla Copley, le fuera otorgado en exclusiva a Le Verrier en 1846 por «probar la existencia y predecir la posición de un nuevo

planeta». La comunidad de Cambridge no podía dejar pasar esa afrenta y dos años después creaba el premio Adams, de carácter bianual. Curiosamente, ese mismo año la Royal Society enmendaba su olvido y concedía la medalla Copley a Adams.

En un claro ejemplo de endogamia, los miembros del St. John's College estipularon que, según la normativa vigente en la época, se trataba de un premio al que solo podían acceder antiguos alumnos de Cambridge, y que se otorgaba a quien realizara un avance significativo en uno de los temas seleccionados previamente por un comité. En las tres primeras ocasiones que se había convocado el premio, los problemas fueron de mecánica celeste,

EL DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO

Tras dos años de trabajo, en 1845 John Couch Adams calculó dónde podía estar el planeta que provocaba las inexplicables desviaciones de la órbita de Urano observadas por los astrónomos. Entonces mostró los resultados a James Challis, director del observatorio de Cambridge, que al verlos le dijo que debería transmitírselos a sir George Biddell Airy, astrónomo real y director del observatorio de Greenwich. Por desgracia, los cálculos de Adams no le gustaron nada a Airy. Primero, porque Adams, hijo de campesinos, carecía de posición social. Segundo, porque él era un hombre eminentemente práctico y le disgustaba la teoría pura; creía que eso de predecir matemáticamente y luego comprobar la predicción no era de recibo: las cosas había que hacerlas justo al revés. A pesar de sus reticencias, pasó las predicciones de Adams a un astrónomo aficionado para que buscara el planeta. La mala suerte perseguía a Adams, pues ese aficionado no pudo hacerlo porque estaba postrado en cama con un tobillo torcido. Mientras tanto, Neptuno se paseaba por el cielo casi en la misma posición calculada por Adams.

Avistamiento desde Berlín

El francés Urbain Jean-Joseph Le Verrier había calculado la posición de Neptuno sin saber nada de los resultados de Adams, y el 31 de agosto de 1846 los presentaba en una memoria a la Academia de Ciencias francesa, en la que situaba al planeta a «5 grados al oeste de la estrella δ Capricorni». Pero a Le Verrier le persiguió el mismo hado que a Adams: ningún astrónomo francés buscó el planeta. Dos meses antes, el 23 de junio, Airy recibió una memoria previa de Le Verrier donde calculaba con menor finura la posición de Neptuno. Una posición que difería en solo un grado de la calculada por Adams. Airy em-

y atrajeron a tan pocos candidatos que solo se había concedido en una ocasión —en 1850—, a un tal Robert Peirson, del que nada se sabe. El resto de las convocatorias, el premio había quedado desierto.

Para el premio de 1857 se pidió a James Challis (1803-1882) que sugiriera un tema apropiado capaz de llamar la atención de posibles candidatos. Challis ocupaba la plaza de Profesor Plumian de Astronomía y era el director del observatorio de Cambridge. Por esas ironías de la vida, Challis se había visto envuelto en el *affaire* de Neptuno. Adams le había enseñado sus cálculos, pero él no debió creérselos porque no inició la búsqueda de Neptuno,

pezó a pensar que quizá existiera ese octavo planeta: Le Verrier era un matemático mucho más prestigioso que Adams. Con mala idea, comentó a diversos astrónomos ingleses las ideas del francés, pero no mencionó para nada a Adams. Incluso el 2 de julio, cuando visitó Cambridge, se encontró accidentalmente con Adams y no le comentó nada de lo que se estaba cociendo en Francia. Mientras, Adams había afinado sus cálculos y decidió presentar sus resultados en una reunión de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, pero cuando llegó, la sesión dedicada a la astronomía había terminado. No pudo convencer a ningún astrónomo de que buscara el planeta donde él decía. Por su parte, Le Verrier, asqueado de que en Francia no le hicieran caso, escribió al ayudante del director del observatorio de Berlín, Johann Galle. El mismo día que recibió la carta de Le Verrier, el 24 de septiembre de 1846, Galle y un estudiante que trabajaba en el observatorio, Heinrich d'Arrest, apuntaron al lugar sugerido por el francés y en menos de una hora encontraron el planeta.



Grabado de hacia 1880 que recrea a Urbain Le Verrier en 1846, calculando la posición de Neptuno.

y cuando lo hizo se dedicó a rastrear amplias zonas del cielo en lugar de apuntar a las coordenadas (correctas) que le había proporcionado Adams. Una vez descubierto Neptuno, Challis quiso subirse al carro de la fama, pero recibió fuertes críticas en la reunión de ese año de la Royal Astronomical Society. Así que se trataba de la persona más indicada para relanzar un premio que había nacido casi difunto. Sin embargo, Challis era pesimista a la hora de entusiasmar a los jóvenes investigadores y así se lo hizo saber a William Thomson:

> Tengo miedo de que los matemáticos de Cambridge no sepan nada de investigaciones que requieran largos cálculos matemáticos. Me

EL PLANETA DE LOS ANILLOS

Con su primitivo telescopio, Galileo observó en 1610 que algo extraño acompañaba a Saturno. Era como si el planeta tuviera asas, o dos grandes lunas a cada lado:

> He observado que el planeta más lejano es un sistema triple... que casi se tocan.

Pero más extraño aún fue cuando dos años más tarde vio que habían desaparecido: «¿Saturno ha devorado a sus propios hijos?» escribió a Marc Welser, miembro de una importante familia del sur de Alemania y que había descubierto su interés por la astronomía al sentirse intrigado por el descubrimiento de las manchas solares. En los años siguientes, diversos astrónomos los observaron en diferentes situaciones, pero nadie aventuraba una explicación que diera cuenta de tan extraordinario objeto y fue olvidado en el cajón de las curiosidades de los cielos.

De Huygens a Cassini

En 1655, el holandés Christian Huygens, con la ayuda de su hermano, construyó un telescopio de 57 mm de apertura con el que descubrió una pequeña estrella que acompañaba a Saturno y que lo orbitaba cada 16 días y 4 horas: el satélite Titán. Pero más le fascinaron esos extraños apéndices que a Huygens le parecieron dos asas. Con muy buen criterio, supuso que no podían estarse quietos, sino que deberían girar alrededor del planeta, y como mantenían su aspecto debía de tratarse de un tipo de anillo. Que desapareciera por entero en 1656 le demostró que debía ser muy estrecho y plano. Así que en 1659, en

alegraría si pudiera sugerir algún tema que fuera capaz de atraer candidatos.

Challis incluía en su carta una lista de cuatro posibilidades. Dos eran problemas relacionados con la mecánica celeste y uno con la aberración de la luz, el tema preferido de un astrónomo como Challis —la aberración de la luz es la diferencia que existe entre la posición observada de una estrella y su posición real debido al efecto combinado de la velocidad de la Tierra y la velocidad de la luz. Este fenómeno es similar a cuando caminamos deprisa bajo la lluvia: aunque esta caiga verticalmente, al desplazarnos nos parece que lo hace con un cierto ángulo—. El cuarto

su *Systema Saturnium*, explicó lo que era esa maravilla celeste:

> Saturno está rodeado por un anillo fino y plano que no lo toca en ningún lugar, el cual es oblicuo a la eclíptica [...] Debo decir aquí algo que termine con los recelos de aquellos que piensan que es extraño e irracional que le dé una forma a un cuerpo celeste, pues nadie se la ha dado hasta ahora, mientras que se da por cierto y se supone que es una ley natural que solo poseen una forma esférica [...] Deben tener en cuenta que no se me ha ocurrido por capricho [...] sino que he visto claramente el anillo con mis propios ojos.

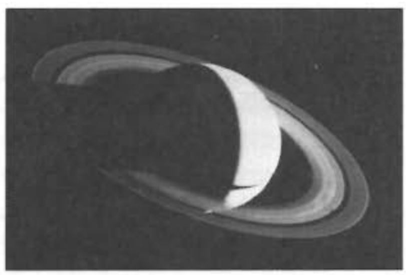


Imagen de Saturno tomada en 1980 desde la sonda espacial Voyager 1. Esta perspectiva permite ver la sombra de Saturno sobre sus anillos.

Así de increíble resultaba el sistema de anillos de Saturno. Es más, la solución aportada por Huygens al acertijo de Saturno no había pasado simplemente por haber construido un potente telescopio —que era burdo y tosco, comparado incluso con los que están al alcance de cualquier astrónomo aficionado hoy—, sino que fue el resultado de un cuidadoso razonamiento. Hubo que esperar a 1675 para que el italiano Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) descubriera que esos anillos poseían estructura, que existía una división en su interior. Hoy se la conoce como la división de Cassini.

tema de su lista era «una investigación de las perturbaciones de las formas de los anillos de Saturno, suponiendo que sean fluidos». Este también era uno de sus favoritos y en esos momentos estaba en boca de muchos astrónomos debido a las conclusiones a las que había llegado por entonces el famoso astrónomo ruso Otto Struve (1897-1963) sobre «el acercamiento del anillo interior al planeta Saturno».

El problema de los anillos se había convertido en un tema caliente desde que en 1850 el astrónomo norteamericano George Phillips Bond (1825-1864), de la Universidad de Harvard, encontró un «anillo oscuro» interior a los dos ya conocidos y descubiertos por Cassini tiempo atrás. Al año siguiente visitó Europa y discutió su descubrimiento con sus colegas. En el observatorio de Pulkovo, en San Petersburgo, pudo observar Saturno en compañía de Otto Struve. En su diario escribió que le pareció que era la primera vez que Struve veía el nuevo anillo y, tras discutirlo con él y con su padre, Wilhelm Struve, llegaron a la conclusión de que el sistema de anillos estaba «en proceso de cambio».

El descubrimiento de Bond espoleó el interés de Struve por Saturno y comenzó una serie de observaciones y una búsqueda exhaustiva entre la literatura hasta llegar a la conclusión de que el anillo oscuro se había formado recientemente. Revisando dos siglos de observaciones del sistema de anillos, concluyó:

> El límite inferior del anillo más interno se está acercando gradualmente al disco del planeta y al mismo tiempo la anchura total de los dos anillos brillantes está en constante crecimiento.

Esta afirmación tenía importantes implicaciones teóricas, porque si realmente los anillos cambiaban su forma con el paso del tiempo, apoyaría la hipótesis que eran fluidos en lugar de sólidos, tal y como Challis pensaba al sugerir este tema para el premio.

Así que, con esta idea en mente, Challis redactó las condiciones del premio de 1857, que iría en torno a la estabilidad de los anillos. Challis suponía que la estabilidad solo aparecía si se tenía en cuenta exclusivamente la fuerza de la gravedad. Y explicó a Thomson:

He separado la parte del problema que podríamos admitir como definitiva de aquella que difícilmente puede responderse sin invocar hipótesis gratuitas.

Curiosamente, la discusión de esas hipótesis desempeñó un papel primordial en la respuesta de Maxwell a la afirmación de Struve de que debía producirse un cambio en la forma de los anillos con el paso del tiempo. Y más importante, considerar el rozamiento como algo que perturbaba la estabilidad del sistema le llevó a reflexionar sobre la viscosidad en los gases y, de ahí, saltó a investigar la teoría cinética de los gases, una de sus obras más importantes.

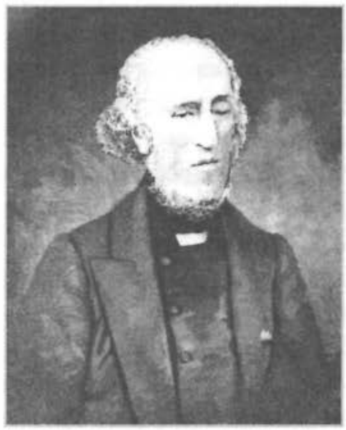
UN ANILLO PARA UN PREMIO

El asunto de los anillos era algo que estaba, como decía Challis, «a tono con las matemáticas de Cambridge». De hecho, el rector del Trinity College, el polímata William Whewell, había propuesto como pregunta de examen para los estudiantes de Cambridge que optaban al Smith's Prize «mostrar que un fluido puede girar en un anillo perfecto, como el de Saturno. ¿Cómo sería el anillo de Saturno si no fuera un cuerpo rígido?».

Esta pregunta tenía mucho que ver con la discusión que sobre ese sistema había hecho Laplace en el capítulo 6 del Libro III de su famoso *Tratado de mecánica celeste*, donde establecía que los movimientos de un anillo rígido eran dinámicamente inestables. Laplace concluyó que los anillos debían ser cuerpos sólidos irregulares cuyos centros de gravedad no coincidían con sus centros geométricos. Por otro lado, la primera parte de la pregunta de Whewell podía haber sido inspirada por una sugerencia del físico belga Joseph-Antoine Ferdinand Plateau (1801-1883) tras establecer experimentalmente las leyes por las que se rigen las burbujas de jabón. Según Plateau la dinámica de los anillos de Saturno podría ser análoga al efecto que tiene la rotación en una esfera de aceite inmersa en una mezcla de agua y alcohol. En este caso,

la esfera se transforma «en un anillo perfectamente regular», y terminaba apuntando que «un cuerpo con una estructura análoga a la de nuestro anillo líquido era el anillo de Saturno». También comentaba que su modelo servía como «imagen en miniatura de la formación de planetas según la cosmogonía nebular de Laplace», según la cual el sistema solar se había formado por condensación de la materia gaseosa que rodeaba al Sol primitivo. Es más, el propio Laplace señaló que los satélites y anillos de Saturno se originaron del mismo modo, a partir del gas de la atmósfera del planeta. En el caso del premio Adams, se preguntaba bajo qué condiciones el anillo sería estable si fuera (1) un sólido, (2) un fluido y (3) si estuviera compuesto por diferentes trozos de materia.

POMPAS DE JABÓN



El físico belga Joseph-Antoine Ferdinand Plateau en un grabado de hacia 1890.

En las demostraciones públicas de la ciencia del siglo XIX se solían utilizar productos como la gelatina, el plástico, el vidrio y el jabón. Respecto a este último, los científicos decimonónicos pensaban que tras las pompas de jabón se ocultaban los misterios de la materia: eran el modelo y el efecto de la sustancia fundamental de la naturaleza. Puede parecer sorprendente, pero algo tan aparentemente insulso como el jabón desempeñó un importante papel en el estudio de la luz. Uno de los grandes de la época, William Thomson, tuvo la osadía intelectual de identificar el éter que transportaba las ondas de luz con la «materia aérea» de la que estaban hechas las pompas de jabón. En 1852, este profesor de Glasgow explicaba a sus alumnos que la interferencia de los colores en las finas películas de jabón demostraba la rareza de esta materia etérea, que se consideraba de una naturaleza similar a la del aire. Sin embargo, en 1870 el propio Thomson demostró en un artículo enviado a la revista *Nature* que, basándose en datos obtenidos en el estudio experimental de las películas de jabón, las moléculas de aire no eran iguales a las del hipotético éter lumínico. Esto no quitó atractivo al tema. En sus con-

No está muy claro cuándo Maxwell empezó a trabajar en el reto planteado por el premio Adams. En julio de 1856, cuando dejó Cambridge para tomar posesión de su plaza de profesor de Filosofía Natural en el Marischal College de Aberdeen, estaba totalmente absorto en el problema. Contó a su amigo R.B. Litchfield que estaba «dedicando una gran parte de tiempo a los anillos de Saturno, un problema que encuentro particularmente duro pero curioso, sobre todo en el caso de un anillo fluido en movimiento». En una carta posterior de octubre señalaba sus avances sobre las condiciones de estabilidad, y el ensayo definitivo lo escribió y envió al jurado el 16 de diciembre. El de Maxwell fue el único trabajo que se presentó.

ferencias públicas, Thomson proyectaba en una gran pantalla los colores del jabón mientras decía:

> Quienes se ocupan de las pompas de jabón tienen la posibilidad de admirar uno de los fenómenos más interesantes de la física. Basta con soplar una pompa de jabón y observar su comportamiento para estudiar la propia vida en su totalidad y aprender, de paso, alguna lección de física.

Pero el verdadero experto en este tema, y quien hizo las investigaciones más detalladas, fue el físico belga Joseph-Antoine Ferdinand Plateau, en la década de 1840. Plateau se había quedado ciego tras una década dedicada a estudiar la persistencia de la visión, por lo que a la hora de examinar los movimientos del jabón, el aceite y de otros fluidos le asistían sus familiares y amigos. Plateau desarrolló varias técnicas, muy ingeniosas, para manejar las burbujas y sus películas. En una de ellas, una masa de aceite en suspensión en una mezcla de alcohol y agua de idéntica densidad le valió para determinar lo que ocurría en ausencia de gravedad. Y tras comprender los caprichos de la glicerina comercial y establecer cuál era la mezcla de jabón y agua más idónea para sus investigaciones, logró producir pompas y películas de jabón de larga duración que sus ayudantes manipulaban con mallas de alambre de distintas formas. De este modo, Plateau consiguió domesticar su comportamiento demostrando que la forma de equilibrio preferida por una pompa era la esfera. Explicó, además, cómo sus gotas de aceite giratorias imitaban a los anillos de Saturno, pues se convertían en una sucesión de láminas circulares. Este trabajo tuvo mucha repercusión en Inglaterra, pues James Challis lo tradujo y un periódico londinense lo publicó en 1846.

«SOBRE LA ESTABILIDAD DEL MOVIMIENTO DE LOS ANILLOS DE SATURNO»

El ensayo estaba dividido en dos partes, tal y como señalaban las bases del premio. En la primera discutía el movimiento de un anillo sólido y en la segunda el movimiento de un anillo fluido formado por partículas inconexas. En un asombroso despliegue de virtuosismo matemático, Maxwell utilizó técnicas bien conocidas, como el teorema de Taylor, el análisis de Fourier y la teoría del potencial, pero empleadas de manera poco corriente.

Maxwell partió del trabajo clásico de Laplace y buscó cómo determinar las condiciones bajo las cuales un anillo rígido en rotación se mantiene estable a partir de las ecuaciones de la teoría del potencial que el propio Laplace desarrolló en su *Mécanique celeste*: «Hemos de determinar las fuerzas que actúan entre el anillo y la esfera, y eso lo haremos mediante el potencial, *V*, debido al anillo». Al obtener las ecuaciones del movimiento para la rotación del anillo alrededor de su centro de gravedad derivó las condiciones para las cuales era posible una rotación uniforme del mismo. Para su sorpresa, Maxwell descubrió que un anillo sólido uniforme podía ser estable, en contra de lo demostrado por Laplace. Algo tenía que estar mal, y fue Challis quien le señaló que se había equivocado al establecer las ecuaciones del potencial gravitatorio del anillo. Este intentó solucionarlo, pero no pudo. Cuando en agosto rehízo su trabajo, pudo subsanar el error y demostrar que un anillo sólido uniforme era totalmente inestable. Eso sí, encontró que un anillo rígido podría ser estable en una extrañísima situación, cuando las 4/5 partes de la masa del anillo estuvieran en un punto de la circunferencia y el resto distribuido de manera desigual. Obviamente, esa no era la estructura observada en Saturno.

La segunda parte de su memoria estaba dedicada a un anillo fluido. En este caso, «cada partícula del anillo debe ser considerada un satélite de Saturno». De este modo, las diferentes partes del anillo las supuso capaces de moverse independientemente; de ahí, «debemos tener en cuenta sobre cada zona del anillo la atracción ejercida debido a las irregularidades de las otras zonas». En

esta ocasión demostró que un anillo fluido acabaría rompiéndose en una serie de gotas separadas. Así que, por eliminación, los anillos debían estar compuestos por infinidad de cuerpos más pequeños, cada uno de ellos orbitando independientemente alrededor del planeta y sujetos a interacciones y choques entre ellos. Sin embargo, las condiciones del premio exigían un estudio matemático de las condiciones de estabilidad de tal anillo. Obviamente, el problema de considerar las ecuaciones de movimiento de cada uno de los trozos que lo componían era intratable, pero para hacerse una idea de lo que podía suceder, Maxwell estudió un caso especial: un único anillo en el que cada uno de los trozos estaba uniformemente espaciado. En esta situación, demostró que un anillo así sería estable. Si existieran dos anillos, uno interior y otro exterior, la inestabilidad del sistema podía predecirse en función de la relación entre sus respectivos radios, pues había ciertos valores para los cuales el sistema se destruiría, pero existían otros valores en los que eso no sucedía.

> «[...] un interesante ejemplo de un método muy bonito, aplicado con gran habilidad a la solución de un problema muy difícil.»
>
> — Elogios del astrónomo real, George Biddell Airy, sobre los argumentos utilizados por Maxwell en «Sobre la estabilidad...».

Esto fue todo lo lejos que pudo llegar. En el ensayo reconoció que si se introducía la posibilidad de que los distintos trozos que componían los anillos colisionaran entre sí —lo que en el fondo aparecía en las ecuaciones como un tipo de fricción—, su predicción era que esto podría causar que el anillo interior se acercara al planeta y el exterior se alejara, lo que implicaba que la conclusión de Struve de que el sistema de anillos cambiaba con el tiempo, era correcta: «Este es el único de nuestros resultados que ha sido observado, o que se cree haber sido observado», escribió. Los anillos de Saturno eran una «nube de aerolitos» orbitando alrededor del gigante gaseoso. Cuando las sondas Voyager fotografiaron Saturno y sus anillos en la década de 1980 tuvimos la prueba directa de que tenía razón.

El 30 de mayo de 1857, Maxwell recibió el premio Adams por su memoria, que pesó poco más de 0,3 kilos. Pero esto no significó el final. Los dos años siguientes continuó trabajando en el problema para hacerlo más inteligible, al tiempo que diseñó un modelo que construyó bajo sus indicaciones un artesano de Aberdeen. Gracias a una serie de bolitas de marfil montadas en un anillo de madera que podían vibrar de dos formas diferentes, Maxwell proporcionó una manera visual de comprender su *tour de force* matemático. Posiblemente, el inspirador de esta empresa fuera William Thomson, quien solía decir que la única manera de saber si alguien ha entendido un tema era preguntándole: «¿puedes construir un modelo mecánico de eso?». En la actualidad, ese modelo puede verse en el laboratorio Cavendish de Cambridge como testigo mudo de que las abstracciones matemáticas pueden transformarse en realidad física.

CAPÍTULO 6

Calor, energía, entropía y átomos

Nadie podía imaginarse que un estudio sobre la evolución dinámica de una «nube de aerolitos» en el espacio, los anillos de Saturno, pudiera servir de base para un trabajo sobre el comportamiento de los gases. Sin embargo, así fue. En Aberdeen, Maxwell realizó uno de los trabajos más importantes de su carrera en un campo que se encontraba en el ojo del huracán de la física de la época, a pesar de que era un tema que llevaba discutiéndose desde la Antigüedad. Y no solo eso, sino que formuló la primera ley estadística en la historia de la física, conocida hoy como la distribución de Maxwell de las velocidades moleculares.

James se había hecho muy amigo del rector del *college*, el reverendo Daniel Dewar. Solía visitarle con frecuencia a su casa y un día Dewar le ofreció pasar unas vacaciones familiares con ellos. James y la hija del reverendo, Katherine Mary Dewar, empezaron a sentirse mutuamente atraídos. Hasta donde sabemos, fue la primera vez que a Maxwell le alcanzaban las flechas de Cupido tras la decepción sufrida cinco años antes. Entonces se había enamorado de su prima hermana Elisabeth (Lizzie) Cay y le pidió matrimonio. Ella aceptó. Sin embargo, la boda se truncó: la familia, preocupada por la consanguinidad, convenció a los jóvenes para que no se casaran. El 18 de febrero de 1858, Maxwell anunció su matrimonio a la familia:

> Querida tía: Esta carta es para decirte que voy a tener esposa. No temas; ella no es matemática, pero hay otras cosas además de eso.

La boda se celebró a principios de junio. Se trataba de una unión inusual para la época, pues ella tenía treinta y cuatro años, siete más que él. La luna de miel la pasaron en Glenlair y Katherine le ayudaba en lo que podía en sus experimentos sobre el color. Su trabajo fue tan bueno, que la curva de cromaticidad que obtuvieron se aproxima mucho a la que se utiliza hoy, publicada en 1931 por la Commission Internationale d'Éclairage.

Poco más de un año después, en abril de 1859, en las manos de James cayó un artículo cuya lectura iba a dirigir sus pasos a un campo que se encontraba en plena efervescencia y para el que su trabajo sobre los anillos de Saturno le iba a venir como anillo al dedo. Trataba sobre el fenómeno de la difusión de los gases, lo que sucede cuando abrimos una botella de perfume y su aroma se esparce por la habitación. El artículo en cuestión había sido escrito por el físico alemán Rudolf Clausius Gottlieb (1822-1888), un nombre que siempre estará asociado a la termodinámica, la ciencia del calor.

UNA NUEVA CIENCIA

El siglo XIX fue el momento decisivo en el que se tendió un puente entre la mecánica y el calor, y sirvió para establecer el predominio de la concepción mecánica de la naturaleza. Tres hombres nacidos entre 1818 y 1824, James Joule, William Thomson y Rudolf Clausius, auparon el estudio del calor al rango de ciencia por derecho propio: la termodinámica, un término que en su origen designó el puro estudio del calor y hoy se aplica a la ciencia de las transformaciones de la energía en cualquiera de sus formas. Joule y Thomson, hombres piadosos, veían en la energía un regalo de Dios, un divino obsequio que persistiría por siempre. En este cuadro las fuerzas, bajadas de su pedestal, únicamente tejían los fenómenos transitorios del mundo. La física estaba a punto de dejar de ser la ciencia de las fuerzas para convertirse en la ciencia de la energía.

El primer momento clave en este cambio fue el mes de julio de 1847, cuando el hijo de un rico cervecero de Manchester, James Prescott Joule, presentó los resultados de sus investigaciones en la reunión de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en Oxford. Llevaba haciéndolo desde 1845, pero nadie le hacía caso. Había logrado estimar cuantitativamente el equivalente mecánico del calor, una relación numérica con la que demostraba que dos conceptos que se pensaba que eran absolutamente dispares, el calor y el movimiento, eran en realidad intercambiables.

Sin embargo, nadie se dio cuenta de las implicaciones salvo un brillante joven que dos años antes, y con veinte de edad, se había graduado en la Universidad de Cambridge, William Thomson. Este físico escocés salió de la reunión de Oxford con la cabeza alborotada. «Las ideas de Joule tienen una ligera tendencia a perturbar la mente de uno», confesó a su hermano James.

Sumido en estos pensamientos, llegó a sus manos una memoria titulada *Sobre la conservación de la fuerza* (1847). Su autor era un físico y médico alemán, figura destacada en la escuela de fisiólogos de Berlín, de nombre Hermann von Helmholtz, y lo había escrito a partir de las notas de una conferencia con el mismo título que había pronunciado en la Physikalische Gesellschaft —Sociedad de Física— de Berlín ese año. Haciéndose eco de los trabajos de Joule, Von Helmholtz enunciaba por primera vez de manera precisa, y ofreciendo una formulación matemática, la que pocos años después iba a ser conocida como la «primera ley de la termodinámica» o el «principio de conservación de la energía»:

> Sea cual sea el número o tipo de transformaciones que se producen en el universo, la suma total de todas las fuerzas [energías] del universo se mantiene constante.

Lo que Von Helmholtz decía era lo mismo que había dicho Joule: trabajo y calor son dos manifestaciones de lo mismo. Los cuidadosos experimentos de Joule habían demostrado que el concepto de «el calor de un cuerpo» era engañoso, pues inducía a pensar que estábamos hablando de algún tipo de sustancia, cuando en realidad un objeto puede aumentar su temperatura de dos formas: al entrar en contacto con otro más caliente o realizando un trabajo sobre él. El resultado de ambas acciones es idéntico.

Thomson recogió las ideas lanzadas por Joule y Von Helmholtz y en 1851 publicó el artículo «Sobre la teoría dinámica del calor», en el que desarrollaba todo el aparato matemático subyacente tras el principio de conservación. Al año siguiente, desarrollaba estas reflexiones con todo detalle en su influyente ensayo «Disipación de la energía mecánica», donde por primera vez y con todas las consecuencias aparecía la palabra «energía», un término

introducido en 1807 por el inglés Thomas Young. El título de esta obra describía en cinco palabras lo que ocurre en la realidad y no en el mundo ideal y sin fricciones de la mecánica. Responde a la pregunta de a dónde va a parar la energía mecánica en el verdadero universo de los molinos y las poleas. Unifica el calor con el movimiento y tras muchos siglos de duro enfrentamiento demuestra más allá de cualquier duda que el calor está relacionado con el movimiento.

Mudar fuerza por energía no constituyó algo drástico, ni motivó enfrentamientos y acalorados debates teológicos, como ocurrió con Copérnico y Darwin, pero que la física concediese el papel de protagonista a la energía arrebatándoselo a la fuerza newtoniana marcó de manera indeleble su desarrollo posterior y permitió avances que hubieran sido imposibles sin este cambio. Sin duda alguna, fue el gran hito de la ciencia del siglo XIX, el concepto unificador de fenómenos tan dispares como el movimiento, el calor, la electricidad o el magnetismo. Sin él, Maxwell no hubiera podido resolver el problema de los anillos de Saturno, donde hizo buen uso del principio de conservación para plantear y resolver las ecuaciones.

La primera ley de la termodinámica encierra una gran riqueza intelectual. La palabra «energía», desgastada por el uso ordinario, es un término del que resulta complicado sustraerse a la complejidad conceptual que encierra, pese a que su significado es intuitivamente obvio y la entendamos como la capacidad de un sistema o cuerpo para realizar transformaciones. No obstante, el establecimiento de la primera ley trajo de la mano una nueva ley, mucho más poderosa y sutil. Fue formulada por Clausius en 1850, tras estudiar detalladamente el funcionamiento de las máquinas térmicas, nombre bajo el cual se aglutinan todos aquellos dispositivos que convierten el calor en trabajo, como la máquina de vapor de James Watt. Hay que resaltar que no la obtuvo de manera teórica, sino de la observación de los procesos donde estaba involucrado el calor. Simplemente admite la existencia de una disimetría esencial en la naturaleza: los cuerpos calientes se enfrían, pero los fríos no se calientan espontáneamente; las pelotas botan hasta detenerse, pero ninguna pelota quieta en el suelo empieza a botar;

los vasos se rompen, pero ninguno se recompone solo. Clausius primero y Thomson después, se dieron cuenta de lo que sucedía. Aunque la energía total debía conservarse en cualquier proceso, la distribución de esa energía cambiaba de un modo irreversible. La primera ley de la termodinámica nos dice que los trapicheos con la energía no pueden hacerla desaparecer, y la segunda nos advierte de hacia dónde deben dirigirse esos trapicheos.

Estas dos leyes explican perfectamente y sin fisuras el funcionamiento de la máquina de vapor. Sin embargo, falta algo. Clausius se dio cuenta de que en cualquier proceso cíclico, todas las propiedades físicas involucradas vuelven a tomar sus valores iniciales, como si nada hubiera pasado. Pero, ¡demonios, *algo* ha pasado!: el agua ha sido bombeada, la locomotora ha llegado a su destino, el telar ha tejido... ¿Cómo es posible que en el universo real haya ocurrido un fenómeno pero no exista ninguna magnitud física que pueda describirlo, que indique que algo ha cambiado? Si volvemos a las dos leyes de la termodinámica, como hizo Clausius, encontraremos la respuesta.

La primera ley conlleva asociada una magnitud llamada «energía» que nos permite cuantificarla, expresarla en nomenclatura matemática. Sin embargo, esto no sucede con la segunda ley; no tenemos ninguna magnitud física con la cual podamos jugar matemáticamente y hacer experimentos, como hizo Joule con la energía. Clausius la encontró, y esa nueva magnitud nos dice mucho acerca de las propiedades más fundamentales de la materia. Él la llamó «entropía» —en alemán *Entropie*—, término que proviene de una raíz griega que significa «vuelta» o «cambio». El razonamiento que llevó a Clausius hacia la entropía abarca diversos pasos matemáticos lo suficientemente complejos y abstractos como para hacer desistir al lector más esforzado.

De esta manera, su definición más simple viene dada como sigue: el cambio de entropía de un proceso es igual al calor intercambiado dividido por la temperatura. Evidentemente, si se calienta un sistema, el calor suministrado será positivo y la entropía crecerá; si se enfría, el calor será negativo y la entropía decrecerá; si no hay intercambio de calor, la entropía no cambiará. Clausius llegó de este modo a una nueva formulación de la segunda ley:

Los procesos naturales son aquellos en los que se verifica un aumento en la entropía del universo. En los procesos reversibles, la entropía no experimenta ningún cambio.

Gracias a esta ley podemos señalar un sentido a todos los fenómenos que podamos imaginar y que comporten un cambio en el estado de un sistema. Únicamente se producirán de manera natural aquellos que, además de cumplir el principio de conservación de la energía, verifiquen que la entropía del sistema aumenta.

PROBABILIDADES ATÓMICAS

De este modo razonaron algunos científicos de la segunda mitad del siglo XIX: aceptando que la materia está compuesta por átomos y sabiendo que planetas, bolas de billar y partículas de polvo se mueven siguiendo las leyes de Newton, ¿por qué no van a hacerlo los átomos? La dificultad esencial con la que se encontraban no era que no supieran nada acerca de las fuerzas que los átomos ejercen entre ellos, sino otra de índole más práctica: ¿Cómo resolver el movimiento de los millones de átomos que componen una pequeña muestra de gas? Se necesita una ecuación por cada átomo, lo que significa resolver millones de ecuaciones simultáneamente. Algo imposible para los físicos, que ya tenían bastantes dificultades a la hora de resolver algo más sencillo como el movimiento de ocho planetas alrededor del Sol (aún no se había descubierto Plutón).

La solución llegó en 1859 de la mano de Maxwell, al estudiar la difusión de los gases. Un problema añadido al anterior era el de la velocidad de difusión. Volvamos a nuestro frasco de perfume. Inicialmente, a presión y temperaturas normales las moléculas debían moverse muy deprisa, a centenares de metros por segundo. Entonces, ¿por qué el perfume se expande tan despacio? En su artículo, Clausius había propuesto que cada molécula sufría un número muy elevado de colisiones en las que no perdía energía (en física se llaman «colisiones elásticas»), y en cada una de

ellas cambiaba completamente de dirección. De este modo, que el aroma del perfume llegara al otro extremo de la habitación requería un viaje de muchos kilómetros. Maxwell explicó el problema al que se enfrentaba con claridad meridiana:

> Si viajas a 17 millas por minuto y tomas un rumbo totalmente diferente 1 700 000 000 veces por segundo, ¿dónde estarás en una hora?

Clausius había supuesto que todas las moléculas del gas se movían a la misma velocidad, algo que sabía que no podía ser verdad. Pero no se le ocurría otro modo de atacar el problema. Para James, el asunto era similar al que se había enfrentado con los anillos de Saturno. Como ocurría en ese caso, no podía describir uno por uno el comportamiento de los átomos de un gas. ¿Qué hacer? Fue un momento de inspiración que, además, requirió unas altas dosis de audacia. Maxwell decidió aparcar las ubicuas leyes de Newton y enfocar el problema como si estuviera realizando un experimento en su laboratorio. En definitiva, aplicar la teoría de probabilidades y la estadística a los gases. Como buen experimentador, sabía que los errores en las medidas seguían leyes estadísticas, lo mismo que los sociólogos las usaban para estudiar las características de las poblaciones. Lo que hizo James fue un salto al vacío, pues a nadie se le había ocurrido aplicar esas mismas leyes estadísticas a los procesos físicos.

Desde esta perspectiva, no se trataba de considerar las propiedades de cada átomo aislado, sino de mediar estas propiedades al conjunto de todos ellos. No seremos capaces de decir, por ejemplo, cuál es la velocidad que lleva una molécula en concreto, pero sí podremos dar una *distribución* de velocidades del conjunto de moléculas que componen el gas. Eso significa que lograremos calcular con cierta exactitud cuántas moléculas se desplazan a una velocidad dada, y lo mismo podemos hacer para la energía de cada partícula. Maxwell acababa de dar un paso de gigante en la física al formular, en una sola ecuación y por primera vez en la historia, una ley estadística.

La consecuencia directa de este tratamiento molecular de los gases es inmediata. Si a nivel microscópico se puede describir lo

que sucede en un gas dando la distribución de velocidades y energías de sus moléculas constituyentes, si a nivel macroscópico se le puede describir igualmente midiendo sus propiedades termodinámicas tales como presión, temperatura o energía interna, y como ambas son descripciones de una misma cosa, entonces las dos deben de estar relacionadas: debemos ser capaces de vincular, por poner un caso, la temperatura de un gas con las propiedades mecánicas de las moléculas que lo componen. Es más, temperatura, calor y trabajo no son más que la consecuencia a nivel macroscópico de lo que ocurre en el interior del gas microscópicamente.

Esta interpretación del calor en términos de la constitución molecular de la materia viene, como bien sabemos, desde tiempos de Demócrito. Pero el primer planteamiento razonablemente serio se lo debemos a John James Waterston (1811-1883), un ingeniero de ferrocarriles escocés. En 1845 enviaba un ensayo a la Royal Society en el que demostraba que la presión de un gas sobre las paredes de un recipiente se podía explicar en función de los choques de las moléculas del gas contra ellas. Se trataba de un trabajo que ponía las bases de la interpretación molecular del calor y, con ello, el comienzo de una rama de la física llamada mecánica estadística. El trabajo fue rechazado y archivado porque a los que evaluaron su artículo les resultaba difícil creer que los átomos se pudieran mover libremente por el interior del recipiente, de pared a pared, y que las propiedades de los gases se redujeran a simple mecánica. Waterston también actuó con poca previsión al olvidar mencionar que uno de los grandes científicos de todos los tiempos, Daniel Bernoulli, profesor de Matemáticas y Física en la Universidad de Basilea, había escrito algo parecido en su clásico tratado de 1738, *Hidrodinámica*.

En el capítulo titulado «Sobre las propiedades y movimientos de los fluidos elásticos [gases], y especialmente el aire», Bernoulli proponía la hipótesis de que un gas era una colección de partículas moviéndose muy rápidamente y que su presión era debida a los choques de estas partículas contra las paredes de la vasija que lo contiene, y suponiendo que su energía cinética era proporcional a la temperatura, dedujo que la presión era así mismo proporcional a la temperatura, que es la ley de Gay-Lussac. La hipótesis de Ber-

noulli no tuvo éxito, pues por aquella época se creía que el calor era la expresión sensible de un misterioso fluido imponderable que se movía de un cuerpo a otro, el calórico. Y aunque su tratado se convirtió en una obra de referencia para quien deseara saber todo lo necesario sobre dinámica de fluidos, esta propuesta fue olvidada. Dos años más tarde, en 1847, John Herapath proponía en *Mathematical Physics* que las propiedades de un gas eran resultado de la energía cinética de las partículas, lo que lo convierte en la primera persona en calcular la velocidad media de los átomos de un gas. Tampoco nadie le prestó atención.

«Podemos encontrar ejemplos de las más elevadas doctrinas de la ciencia en los juegos y la gimnasia, en los viajes por tierra y por agua, en las tormentas del cielo y del mar, y dondequiera que haya materia en movimiento.»

— James Clerk Maxwell.

El trabajo de Waterston durmió el sueño de los justos hasta que en 1892 John William Strutt (1842-1919) —o tercer barón de Rayleigh, como le conocen los físicos— lo descubrió en los archivos y lo publicó en la revista de la sociedad. Pero Waterston ya no estaba para verlo. Este ingeniero que marchó a la India en 1839 contratado por la Compañía de las Indias Orientales y que regresó a su natal Edimburgo en 1857 para dedicarse en cuerpo y alma a la ciencia del calor, desapareció sin dejar rastro el 18 de junio de 1883. Salió a dar un paseo por los canales de Edimburgo y nunca más volvió a aparecer.

Realmente, el pobre Waterston tuvo mala suerte: no solo su artículo fue rechazado, sino que tampoco le hicieron caso cuando presentó sus ideas en una comunicación a la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en su reunión anual de 1851. En ella, dijo lo siguiente:

> El equilibrio en presiones y temperaturas entre dos gases tiene lugar cuando las cantidades de átomos por unidad de volumen son iguales y cuando la fuerza viva [energía cinética] de cada átomo es la misma.

Acababa de comparar dos magnitudes que, al parecer de sus honorables colegas, eran imposibles de comparar: la energía cinética de las partículas y la temperatura del gas. Al afirmar que la energía cinética media de las moléculas de un gas es la misma, estaba dando la primera formulación de lo que más tarde se conocería como el teorema de equipartición de la teoría cinética de los gases. De este modo, Waterston daba un significado físico a la temperatura, pero quizá abrumado por la falta de interés por parte del resto de sus colegas, fue incapaz de ver toda la riqueza de su propuesta. Algo que sí hizo Maxwell en su artículo de 1860, «Illustrations of the Dynamical Theory of Gases».

LA TEORÍA CINÉTICA

El genio teórico de Maxwell le llevó a obtener, a partir de los mismos presupuestos que Waterston, una serie de interesantes predicciones sobre ciertas propiedades de los gases que fueron corroboradas por los experimentos. La idea base de los cálculos de Maxwell se encontraba en una serie de suposiciones bien sencillas. Primero, que los gases están compuestos por un número enorme de partículas idénticas que se mueven violentamente. Segundo, que su tamaño es despreciable en comparación con el espacio libre entre ellas y que cuando colisionan —cosa que hacen continuamente—, rebotan sin que se pierda un ápice de la energía primitiva; como mucho puede pasar de una a otra parte de la que llevan —las moléculas *también* cumplen el principio de conservación de la energía, y suponemos que no transfieren nada de su energía a las moléculas que componen el recipiente—. Tercero, que la única energía que poseen es la cinética propia de su movimiento por el recipiente. Siendo estrictos, esto solo ocurre cuando el gas es monoatómico, esto es, un gas que no está compuesto por moléculas, sino por átomos. En el caso de que sean moléculas —un gas diatómico, triatómico...—, existen otras energías añadidas debido a que pueden verificarse otro tipo de movimientos propios: vibraciones, rotaciones en torno al centro de gravedad...





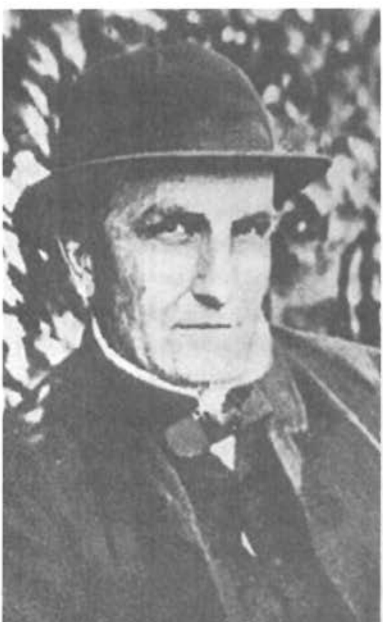




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Maxwell y su esposa Katherine en 1869.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Ludwig Boltzmann introdujo en el panorama científico la interpretación microscópica de la entropía. En la década de 1870, el físico austriaco publicó una serie de artículos en los que reconocía la importancia de la teoría electromagnética de Maxwell.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
John James Waterston. Su interpretación del calor en términos de la constitución molecular no fue tomada en cuenta hasta que en 1892 John William Strutt publicó un artículo suyo que fue rechazado por la Royal Society de Londres.

FOTO INFERIOR DERECHA:
El físico alemán Hermann von Helmholtz fue el primero en formular matemáticamente el principio de conservación de la energía. Retrato por Ludwig Knaus, en 1881. Antigua Galería Nacional, Berlín.

Con estas suposiciones en la mano, Maxwell reprodujo el resultado de Waterston y además obtuvo uno de los resultados más importantes de la recién nacida teoría cinética de los gases: la energía cinética promedio depende exclusivamente de la temperatura y no de la masa o del número de átomos que componen la molécula. Las consecuencias de esta conclusión son increíbles. Demuestra la existencia de una conexión entre las propiedades microscópicas y macroscópicas de los gases, pero sobre todo ofrece una nueva visión de lo que es la temperatura y el calor. Si comparamos dos gases a diferentes temperaturas, el gas más caliente es aquel cuyas moléculas tienen mayor energía cinética. Y si calentamos el más frío para que alcance la misma temperatura que el caliente, lo que estamos haciendo es aumentar la energía cinética de sus moléculas, o lo que es lo mismo, estamos aumentando su velocidad.

«Los gases se distinguen de otras formas de la materia, no solo por su poder de expansión indefinida así como por llenar cualquier recipiente, por grande que sea, y porque el calor tiene un gran efecto en su dilatación, sino por la uniformidad y la simplicidad de las leyes que regulan estos cambios.»

— **James Clerk Maxwell, en *Teoría del calor* (1871).**

Con la teoría cinética, también estamos capacitados para explicar por qué si ponemos en contacto dos gases a diferentes temperaturas, esta tiende a equilibrarse. Las moléculas del gas más caliente tienen mayor energía cinética que las del gas frío. Al ponerlos en contacto, las moléculas de ambos gases empiezan a colisionar entre ellas y, como suele suceder en los choques de bolas de billar, las que tienen más energía suelen transferir parte de ella a las de menor energía. Resultado: si dejamos pasar el tiempo suficiente, al final tendremos la misma distribución de energía en todas las moléculas; habremos alcanzado el *equilibrio térmico*.

Visto a escala microscópica, la energía de un gas es, simplemente, la suma de todas las energías de las moléculas que lo componen. Pero, ¿podemos diferenciar entre los dos tipos de transmisión

de energía, el trabajo y el calor? Rotundamente, sí. Pensemos en el pistón de una máquina de vapor, una máquina que convierte el calor en trabajo. Al calentarse, el gas encerrado en el cilindro empuja el pistón. Hemos dicho que la energía interna del gas no es más que la energía cinética de la partículas, o lo que es lo mismo, el movimiento de las partículas. Por tanto, lo que tenemos es una transferencia de movimiento. Ahora bien, el movimiento de las partículas del gas es desordenado, cada una va en diferentes direcciones. Sin embargo, cuando el pistón se desplaza, sus moléculas lo hacen todas en el mismo sentido: es un movimiento ordenado. Esta es la diferencia entre calor y trabajo, el tipo de movimiento de las partículas. La transferencia de energía en forma de calor —el hecho de calentar un gas— no es otra cosa que las partículas se muevan desordenadamente, cada una por su cuenta. No obstante, cuando se transfiere en forma de trabajo, lo que ocurre es que todas ellas se mueven ordenadamente. Por tanto, una máquina térmica cuya función es convertir el calor en trabajo, en realidad lo que hace es transformar un movimiento desordenado —el de las partículas del gas— en un movimiento ordenado —el de las partículas del pistón—.

Llegados a este punto, uno puede preguntarse acerca de eso que hemos definido como entropía. ¿Qué tiene que decir la teoría cinética sobre ella? La interpretación microscópica de la entropía tiene un regusto amargo. Su descubridor, el físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), se suicidó antes de recibir el reconocimiento de sus colegas por su gran contribución.

EL CASINO ATÓMICO

En una lápida del cementerio de Viena está cincelada una ecuación:

$$S = k \cdot \log W.$$

La letra S designa la entropía de un sistema, k es una constante fundamental de la naturaleza que hoy se conoce como constante de Boltzmann, «log» es la representación de una fun-

ción matemática llamada logaritmo, y *W* es una medida del sistema relacionada, como veremos a continuación, con el desorden del sistema. Las implicaciones que esta ecuación tiene en nuestro mundo son tremendas. No hace falta que prolonguemos más la incógnita: la entropía es una medida del desorden del sistema. Es la variable del caos.

Para entenderlo, debemos hacer una pequeña parada en un casino muy especial, donde solo hay dos mesas de juego: una con monedas y otra con cartas. En la primera mesa, el crupier nos entrega una moneda grande y nos pide que la arrojemos al aire seis veces seguidas. En un papel debemos ir anotando lo que sale: cara, cara, cruz, cara, cruz, cruz. Ahora nos invita a hacerlo de nuevo: cara, cara, cruz, cruz, cara, cara. Si seguimos haciéndolo muchas veces consecutivas conseguiremos, además de un dolor en el dedo, una lista con todas las posibles combinaciones de cara y cruz. De hecho, y descartando todas las que salen repetidas, nos quedan solo 64 combinaciones. Una característica fundamental que tienen es que todas ellas son igualmente probables, es decir, que si hacemos una tirada más, cualquiera de ellas tiene la misma probabilidad de salir que las otras. Ahora bien, el crupier nos dice que le importa poco el orden en que salen las cruces y las caras; solo quiere saber cuántas caras han salido. En este caso, el asunto es más sencillo. Si echamos un vistazo a nuestra lista de 64 tiradas, veremos que se puede ordenar en función del número de caras: solo hay 1 tirada con todo caras, 6 donde salen cinco caras, 15 con cuatro, 20 con tres, 15 con dos, 6 con una y finalmente 1 con ninguna cara, o sea, todo cruces. Esta manera de recoger la información nos proporciona una característica que al principio se nos había pasado por alto: si hay 20 formas distintas en que pueden salir tres caras y solo una para que salgan las seis caras, como cualquier tirada es igualmente posible, si lanzamos otra vez la moneda es más probable que salgan tres caras a que salgan todas.

Pasemos ahora a la mesa de las cartas. Allí nos espera un ilusionista. Mezcla la baraja con gran profesionalidad, y al terminar las va dejando una sobre otra, cara arriba, sobre la mesa. Ante la expectativa de un gran truco de magia, esperamos que

CAOS TÉRMICO



Retrato del botánico escocés Robert Brown por el pintor inglés Henry William Pickersgill (1782-1875).

Si llenamos un vaso de agua y lo miramos, lo que veremos será un fluido uniforme, cristalino, sin movimiento alguno —a no ser, claro, que le demos un golpe al vaso— y sin percibir ningún tipo de estructura interna. Sin embargo, esta uniformidad del agua es solo aparente. Si la observamos con un aumento de algunos millones de veces descubriremos una diáfana estructura granular, formada por innumerables partículas muy apretadas entre sí. También descubriremos que el agua se encuentra muy lejos de la quietud. Sus moléculas están en un estado de violenta agitación, dando vueltas y empujándose entre sí como la gente que abarrota un bar en un día festivo. Este movimiento irregular de las moléculas de agua recibe el nombre de movimiento o agitación térmica, por la sencilla razón de que su causa está en el calor. Nosotros no vemos esa agitación molecular, pero lo que sí provoca es cierta irritación, por decirlo de alguna forma, en nuestras células nerviosas, originando la sensación que denominamos «calor».

Movimiento browniano

Para organismos mucho más pequeños que nosotros, como pueden ser las bacterias que viven en un charco, el efecto es más pronunciado. Las pobres bacterias son pateadas, empujadas y movidas incesantemente por las inquietas moléculas de agua. Este fenómeno es conocido con el nombre de «movimiento browniano», en honor a su descubridor, Robert Brown (1773-1858). Claro que no lo hizo con bacterias, sino con diminutos polvillos de polen. Una demostración clara y meridiana de lo que acabamos de decir la tenemos si hacemos el siguiente experimento. Llenemos un vaso con agua del grifo. A su vez, calentamos agua y la vertimos en otro vaso. Si añadimos unas gotas de tinta en ambos vasos, esta se difundirá más rápidamente en el vaso de agua caliente que en el de agua fría. La razón es muy simple: las moléculas de agua se mueven con más violencia a medida que adquieren más calor y golpean con más frecuencia a las partículas de tinta, enviándolas rápidamente a puntos lejanos dentro del vaso. Esto también tiene relación con lo que llamamos «temperatura». En el fondo, la temperatura no es más que una medida de la agitación térmica de las moléculas de agua contenidas en el vaso: es el efecto visible a nuestros ojos de que las moléculas chocan unas contra otras.

salgan ordenadas en alguna manera sorprendente: primero las espadas, comenzando desde el as hasta el rey, y así el resto de los palos. Sin embargo, nuestra sorpresa es mayúscula cuando vemos aparecer el cuatro de espadas seguido del siete de copas, la sota de copas, el nueve de oros, el as de espadas... Todo muy desordenado. Con indignación le espetamos que no se trata de un truco de magia, que eso lo podríamos haber hecho nosotros simplemente mezclando las cartas. «¿Sí? —nos responde—. ¿Puede repetir el mismo orden en que he sacado yo las cartas de la baraja? ¿Cree que le resultaría tan fácil como sacar los palos ordenados? ¡Inténtelo!»

Si nos detenemos a pensar un poco, descubrimos que el mago tiene razón, pero hay algo que falla. El orden en que él ha sacado las cartas es igualmente probable que el que nosotros esperábamos. De hecho, *cualquier* orden es igualmente probable y hay 10^{48} ordenaciones posibles, luego la probabilidad de obtener una determinada es de uno frente a 10^{48}, algo inconce-

EL DEMONIO DE MAXWELL

Para demostrar que la segunda ley de la termodinámica tenía solo «una certidumbre estadística», Maxwell propuso un experimento mental que es conocido como «el demonio de Maxwell». Lo menciona por primera vez en una carta del 11 de diciembre de 1867 a su amigo Peter Guthrie Tait y posteriormente lo incluyó en su libro *Theory of Heat* (1871) en el epígrafe «Limitations of the Second Law of Thermodynamics». Su planteamiento fue el siguiente: imaginemos un recipiente como el de la figura, dividido en dos partes, A y B, separadas por un tabique en el que hay un agujero que se puede abrir y cerrar a voluntad. Ambas partes contienen el mismo gas a la misma temperatura. Ahora imaginemos que un ser «capaz de seguir el curso de cada molécula... abre y cierra este agujero de modo que solo permite pasar las moléculas más rápidas de A a B, y solo las lentas de B a A. De este modo, y sin hacer un gasto de trabajo, aumentaría la temperatura de B y bajaría la de A, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica». Con este «demonio» (nombre acuñado por Thomson y que a Maxwell nunca le gustó), Maxwell quiso demostrar que todo intento por desarrollar una teoría dinámica de termodinámica —el empeño de los alemanes Clausius y Von Helmholtz— era fútil:

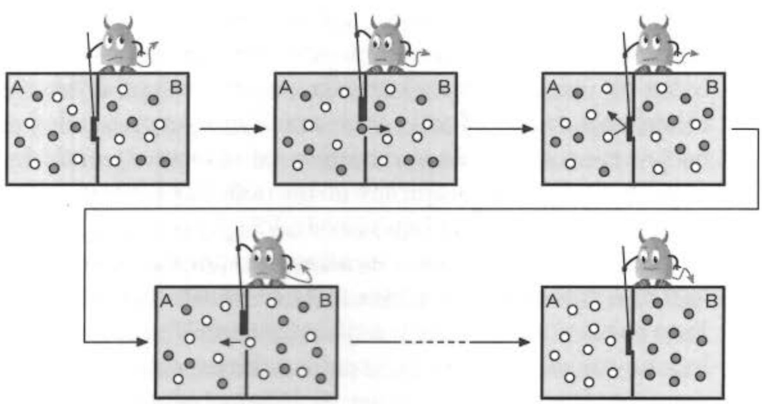
biblemente pequeño. Si se suele considerar que ha sucedido un milagro cuando la probabilidad de que ocurra es de una en un billón (10^{12}), entonces, según el mago, *cualquier* orden en que queda la baraja tras mezclarla *es* un milagro. Pero nuestra intuición nos dice que lo que ha hecho el mago no es un milagro. Cuando se mezcla la baraja, debe salir ordenada —al menos de la forma que nosotros entendemos que significa «ordenada»— de alguna manera.

ENTROPÍA Y RÉQUIEM

Todas estas disquisiciones nos sirven para ilustrar el significado de la entropía. Recordemos que en la fórmula de Boltzmann aparece el término W, del que dijimos que está relacionado con una medida del desorden. Profundicemos más en esto. Regresemos a la

Estamos obligados a adoptar lo que he descrito como un método estadístico de cálculo y abandonar el estricto método dinámico.

La segunda ley era una ley estadística.



mesa de las monedas. Aquí, *W* está representado por el número de maneras distintas en que pueden aparecer una, dos, tres, cuatro, cinco o seis caras. No importa cómo hayan salido, solo importa el número de caras y de cruces. Para el caso de las moléculas de un gas, *W* representa el número posible de estados (que vienen definidos por la posición, velocidad, energía... de la partícula en cuestión) en que pueden encontrarse y que nos proporcionan la misma descripción física del gas, o sea, que nos dan los mismos valores de presión, energía interna, temperatura, volumen... Así, el estado de la molécula representa la cara o la cruz de una moneda en particular, mientras que las propiedades termodinámicas son el número de caras totales. *W* es, simplemente, el número de maneras en que se puede organizar internamente un sistema sin que un observador externo aprecie diferencia alguna.

Por otro lado, del mismo modo que en el caso de las cartas de una baraja podemos colocarlas de 10^{48} situaciones posibles, los estados de las moléculas de un gas también pueden tomar infinidad de valores. Y si la mayoría de las veces la baraja aparece desordenada ante nuestros ojos, igual ocurre con los gases: el estado más probable de las partículas de un gas es el de desorden. Pero, ¿qué significa orden en un gas? En la baraja es fácil apreciarlo, pues corresponde a una disposición que nos llama particularmente la atención. Para un gas viene a ser algo parecido: todas las moléculas moviéndose en la misma dirección; dos gases que, contenidos en el mismo recipiente, no estén mezclados sino separados; un gas que se encuentre comprimido, sin influencia externa, en una esquina de la vasija que lo contiene dejando el resto totalmente vacío... Todas estas configuraciones pueden suceder, no hay ninguna ley de la dinámica que lo impida. Debido al gran número de colisiones que sufren las moléculas, puede ocurrir que, por ejemplo, todas acaben moviéndose hacia la derecha del recipiente. Sin embargo, esto es altamente improbable, más incluso que tras mezclar una baraja salga ordenada por número y palo. Esto es así por algo muy sencillo y que no debe dejar de repetirse: hay un mayor número de combinaciones desordenadas que ordenadas. Por tanto, dado que *W* define el número de situaciones microscópicas relacionadas con una macroscópica y como son

más probables las situaciones desordenadas, entonces *W* está relacionado con el desorden del sistema. A mayor desorden, mayor valor de *W*. De todo lo dicho, la conclusión es obvia: la situación más probable de un gas es la de desorden.

Supongamos que tenemos un gas perfectamente ordenado en el que las partículas viajan todas hacia la derecha a la misma velocidad. Cuando lleguen a la pared del recipiente, rebotarán. Las primeras que lo hagan, al haber cambiado de sentido, chocarán con las que llegan. Y aquí empieza la desorganización: en los choques se transferirán energía y cambiarán sus velocidades de modo que al final desaparecerá todo vestigio de movimiento organizado. Podría ocurrir que los infinitos choques produjeran que todas las partículas se moviesen hacia la izquierda, pero eso es altamente improbable.

> ««[...] el objetivo de la ciencia exacta es reducir los problemas de la naturaleza a la determinación de las cantidades mediante operaciones con números.»
>
> — James Clerk Maxwell.

Ahora ya estamos en condiciones de entender lo que es la entropía: una medida del desorden en la naturaleza. Y como el desorden es más probable que ocurra que el orden, la entropía tiende a aumentar, como dice la segunda ley. Pero con una pequeña diferencia. Si hasta ahora la segunda ley «prohibía» la disminución de la entropía en cualquier proceso natural, desde un punto de vista molecular la segunda ley dice que esos sucesos no son imposibles, sino altamente improbables. En definitiva, que puede suceder que un vaso roto se recomponga o que el calor pase del cuerpo frío al caliente. Claro que puede que no viéramos eso ni aunque pasaran varias veces la edad actual del universo...

Esta fue la obra de Boltzmann. Estableció un vínculo entre las propiedades de la materia definidas por Thomson y Clausius y el comportamiento de las partículas que la componen, los átomos. Y no solo eso. Su ecuación refleja otro aspecto esencial. No importa la forma en que se disperse la energía en un proceso determinado,

siempre lo hará de modo que conlleve un aumento de entropía. Ahí reside la fuerza de la ecuación de Boltzmann: da cuenta y razón de la degradación de todo lo existente. Boltzmann, aunque corto de vista, percibió mucho más allá que sus colegas, que no acababan de creerse que los átomos realmente existían. Muchos dudaron de sus argumentos creyendo que el universo tenía una finalidad, un propósito, y su evolución no era el fruto de simples colisiones azarosas. Se volvía a repetir el triste camino que otros investigadores habían recorrido antes que él. Desdeñado y desencantado por todo, en 1906 se suicidó. Irónicamente, hacía menos de un año que un joven trabajador de una oficina de patentes de Suiza llamado Albert Einstein había publicado un artículo en la revista *Anales de física* donde demostraba que, aplicando las suposiciones de Boltzmann, se podía explicar el movimiento errático de un grano de polen en el agua, un misterio que había permanecido sin resolver desde 1828.

REPARTIENDO ENERGÍA

Uno de los primeros pasos en el desarrollo de la teoría cinética de los gases consistió en calcular el número de moléculas que viajaban a una velocidad dada. Para ello, la intuición de Maxwell le había hecho ignorar las leyes de Newton, capaces de hacer predicciones precisas sobre el movimiento de las partículas, y arrojarse en brazos de la interpretación del movimiento molecular como un simple juego de azar. Después de todo, no estaba muy equivocado. El movimiento de la bola en una ruleta está guiado por las leyes de Newton, que son incapaces de predecir el número en el que iba a caer. Como ya hemos dicho anteriormente, para aplicar los métodos probabilísticos, Maxwell debía imponer una condición más: cualquier estado de un sistema es tan probable como cualquier otro.

En el caso de una ruleta es fácil de ver. Significa que cualquier número tiene las mismas probabilidades de salir. Pero en los gases la cosa no es tan fácil. Debemos remitirnos al principio de conser-

vación de la energía, el cual nos dice que si tenemos un sistema aislado —un sistema que ni intercambia calor ni trabajo con el exterior—, entonces su energía total debe permanecer constante. Ahora bien, las moléculas de un gas pueden distribuirse la energía como mejor les parezca, con tal de que al final la suma completa de cada una de ellas dé el valor de la energía total del sistema. Si ahora echamos mano de la probabilidad, la consecuencia obvia es que todos los estados posibles del sistema con la misma energía total son igualmente probables.

> «Es un genio, pero hay que repasar sus cuentas.»
>
> — Palabras del físico prusiano Gustav Kirchhoff (1824-1887), padre de la espectroscopia, en referencia a los errores matemáticos de Maxwell.

Maxwell aplicó esta conjetura a la distribución de la energía de traslación de las moléculas de un gas. Es el caso más sencillo, pues solo deben tenerse en cuenta sus movimientos de traslación por el recipiente y para nada otro tipo de movimientos, como el de rotación o el de vibración o la energía potencial de vibración. Como la energía cinética está relacionada con la velocidad, si conocemos cuántas moléculas tienen una determinada energía cinética, sabremos cuál es la distribución de velocidades del sistema.

¿Para qué servía todo eso? Dicho simplemente, para todo. Con una distribución de velocidades en la mano, cualquiera podía calcular las propiedades macroscópicas de los gases: presión, temperatura..., y la que nos interesa en estos momentos: la energía de las moléculas. Uno de los resultados más importantes obtenidos por Maxwell fue que si comparamos dos gases diferentes que se encuentran a la misma temperatura, la energía cinética media de cada molécula es la misma y depende únicamente de la temperatura absoluta del sistema y para nada de la masa o del número de átomos que componen la molécula. La energía cinética media es directamente proporcional a la temperatura. Con esta relación, válida solo cuando el gas se encuentra en equilibrio —cuando sus moléculas presentan la distribución de velocidades obtenida por Maxwell—, podemos calcular el valor de la energía cinética de una molécula multiplicando su temperatura absoluta

por la constante de proporcionalidad, denominada con la letra *k*. Y como muestra del hermoso engarzamiento de los distintos campos de la ciencia, estamos ante la misma constante que había permitido a Boltzmann calcular el valor de la entropía de un sistema a partir de sus propiedades microscópicas, la llamada constante de Boltzmann.

Este cálculo de Maxwell es, en realidad, aplicación de una consecuencia más general de la teoría cinética llamada «teorema de equipartición», que describe las relaciones entre la energía molecular media y la temperatura para todos los tipos de movimientos que puede presentar una partícula. En nuestra discusión, el teorema de equipartición implica, en primer lugar, que moléculas de diferentes sustancias, cuando se encuentran a la misma temperatura, tienen la misma energía cinética media. Ahora bien, diferentes tipos de moléculas tienen distintas masas —el agua es dieciocho veces más pesada que el hidrógeno y el oxígeno dieciséis veces más—, luego si la energía media debe ser la misma, entonces la velocidad media no puede serlo. Las moléculas más pesadas se moverán con lentitud, y las más ligeras rápidamente. Y en segundo lugar, la energía cinética media por molécula es igual al semiproducto de la constante *k* por la temperatura absoluta del sistema. Luego, si aumentamos el doble el valor de la temperatura, la energía media también se doblará. O dicho como ya sabíamos, la temperatura no es más que la medida macroscópica de la energía cinética de las partículas de un sistema.

Como no podía ser de otra forma, en su aplicación a casos prácticos para comprobar la validez de su teoría, Maxwell cometió errores matemáticos. Aplicada a la conducción de calor se equivocó varias veces al derivar las ecuaciones pertinentes, además de errar en un factor 8000 a la hora de calcular la conductividad térmica del cobre respecto al aire: olvidó convertir los kilogramos en libras y las horas en segundos. Pero el problema que agobió a Maxwell desde que publicó su primer artículo sobre la teoría cinética hasta el final de sus días fue el cálculo del calor específico, que refleja la cantidad de calor que hay que suministrar a una sustancia para que eleve su temperatura un grado centígrado. Las discrepancias entre la teoría y el valor experimental eran demasiado gran-

UN TRISTE FINAL



El físico y matemático alemán Rudolf Clausius, considerado uno de los pilares de la termodinámica.

Por desgracia, la historia de la teoría cinética termina con un regusto amargo a causa de un incidente que habla más de la naturaleza humana que de la de los gases. Desde 1857 y durante un período de quince años, Clausius y Maxwell se intercambiaron cartas y artículos científicos, lo que demuestra lo mucho que dependió de este hecho la creación y afianzamiento de la teoría cinética de los gases. De este modo, los artículos de Clausius aparecían rápidamente traducidos al inglés en el *Philosophical Magazine*. Sin embargo, las discrepancias teóricas fueron haciéndose mayores, hasta el punto que al final Clausius rechazó el enfoque estadístico en su conjunto. Él también había intentado definir la entropía a partir de los movimientos moleculares, siguiendo un enfoque puramente dinámico, lo que dio lugar a una cantidad considerable de comentarios críticos, sobre todo de Maxwell. Peter Guthrie Tait sacó a pasear su marcado sentimiento nacionalista: vituperó a Clausius y aprovechó la ocasión para defender la prioridad y mayor complejidad de pensamiento termodinámico de su amigo Thomson, malinterpretando el concepto de entropía al hacerlo. Clausius protestó diciendo que los británicos se estaban arrogando con más mérito sobre el desarrollo de la teoría del calor del que realmente merecían. Maxwell, buen amigo de Tait y de Thomson, se quejó del autobombo que se estaba dando Clausius y en su libro *Teoría del calor* (1871) ignoró totalmente su obra. El alemán se quejó, lo que obligó a Maxwell a corregir su error en la siguiente edición de su libro. Así explicó su parecer a Tait:

> Observa cómo mi invencible ignorancia de ciertos modos de pensamiento han causado que Clausius esté en desacuerdo conmigo, así que he fracasado en mis intentos de minimizarlo y él no ocupa en mi libro el lugar sobre el calor, el lugar que merece por sus otras virtudes.

des: «Aquí nos enfrentamos cara a cara con la mayor dificultad que ha encontrado la teoría molecular». Pero era un problema irresoluble desde la física clásica: solo la llegada de la mecánica cuántica resolvió el problema.

UN NUEVO CAMBIO

James presentó sus ideas en la reunión de la Asociación para el Avance de la Ciencia celebrada en Aberdeen en septiembre de 1859, las cuales redactó en forma de artículo al año siguiente bajo el título «Illustrations of the Dynamical Theory of Gases». Pero sus días en el Marischal College estaban contados: la unión de las dos instituciones universitarias para crear la nueva Universidad de Aberdeen se iba a concretar para el curso 1860-1861. El problema era que en el King's College también había una plaza de profesor de Filosofía Natural y la nueva universidad no iba a conservar las dos plazas. La del King's la detentaba David Thomson, que era además su vicerrector y secretario. Era un personaje tan astuto en las negociaciones que se había ganado el sobrenombre de «artero». No hace falta decir que en la refriega política ganó él. La excelencia de los trabajos científicos de Maxwell podría haber cambiado el fiel de la balanza, pero en Aberdeen no había nadie que supiera valorarlos.

Justo en ese momento, su mentor James Forbes dejaba vacante su plaza de profesor en la Universidad de Edimburgo para ser rector de la St. Andrews. Era una oportunidad estupenda y se presentó a la plaza. También lo hizo su amigo Tait, que en esos momentos se encontraba en Belfast. Maxwell volvió a perder. A la tercera va la vencida, y el King's College de Londres ofreció al poco tiempo una plaza: esta vez hubo suerte y escogieron a James. El tiempo que transcurrió hasta su toma de posesión lo pasó en Glenlair poniendo en orden su propiedad, financiando en parte la construcción de una nueva iglesia en Corsock, al norte de Glenlair, escribiendo un importante artículo sobre la teoría de los gases, otro sobre esferas elásticas y un informe de sus experimentos sobre los colores para la Royal Society. Casi enseguida le comunicaron que la Royal Society le había concedido la medalla Rumford.

Pero ese verano de 1860 también estuvo a punto de morir. Había acudido a una feria de caballos para comprarle un poni a Katherine y al poco de regresar enfermó de viruela. Por suerte, se recuperó y James siempre estuvo convencido de que fue gracias a los cuidados de su esposa. En octubre de ese mismo año empaquetaron sus pertenencias para instalarse en la capital del Imperio británico.

CAPÍTULO 7

Universo eléctrico

El trabajo más importante de Maxwell fue la formulación de la teoría electromagnética. Supuso un importante esfuerzo científico y con él quedaron explicados una serie de fenómenos que habían estado creando dolores de cabeza a los físicos de varias generaciones. Pero, ante todo, fue una revolución en la forma de entender la naturaleza, al introducir de manera rigurosa y formulada matemáticamente uno de los conceptos fundamentales de la física: el campo.

A comienzos del siglo XIX, la electricidad era el nuevo juguete científico gracias al descubrimiento de la pila eléctrica. Quien tuvo la culpa de la construcción de la primera no fue un hombre, sino una rana... Más concretamente, la pata diseccionada de una rana y una serie de ingeniosos experimentos del médico, fisiólogo y físico italiano Luigi Galvani (1737-1798) en 1786. Aquel año, Galvani observó que una pata de rana diseccionada se contraía cuando se la colocaba en una mesa cerca de un generador electrostático, un aparato capaz de generar descargas eléctricas. Los trabajos de Galvani sobre el efecto de la electricidad en la pata de aquella anónima rana —él la denominó «electricidad animal»— llamaron la atención de otro italiano, el físico Alessandro Volta (1745-1827). Para Volta, las contracciones no eran nada extraordinario, ningún tipo de electricidad distinta a la ya conocida. Simplemente, los nervios y los músculos de la rana operaban como un aparato extremadamente sensible capaz de detectar corrientes eléctricas muy débiles, mucho más que las que se podían medir con el instrumental de entonces. Volta probó sus ideas con la invención de la primera batería eléctrica práctica, que describió en una carta a la Royal Society en 1800. La batería de Volta estaba compuesta por dos células de metales diferentes, tales como plata y cinc, separados por discos de cartón humedecidos con agua salada y conectados en serie. Una combinación de estas células componían

la batería, su *couronne de tasses*, y la cantidad de electricidad suministrada dependía del número de células utilizadas.

La batería de Volta abrió el camino a la descomposición de las sustancias en sus elementos constituyentes. Con ella, el químico británico Humphry Davy y su joven ayudante Michael Faraday habían descompuesto el agua en hidrógeno y oxígeno y obtenido sodio y cloro. Este proceso de descomposición eléctrica y la causa de la migración de sus productos hacia los polos de la pila eran motivo de una animada controversia. Lo que pronto quedó perfectamente establecido es que se debía a una reacción química entre la salmuera y el pedazo de cinc, que poco a poco se iba disolviendo. Cuando se terminaba el cinc, la reacción química se detenía y dejaba de medirse corriente eléctrica. La moraleja era que las reacciones químicas producían electricidad y la electricidad producía reacciones químicas. Ahora bien, si la electricidad guardaba en su interior tales sorpresas, el magnetismo era aún más misterioso.

EL INCOMPRENSIBLE IMÁN

Quizá haya pocas cosas tan fascinantes como observar el comportamiento de un par de imanes. Tal vez por eso el magnetismo siempre haya estado envuelto en un halo de misterio. Para los antiguos, era la prueba palpable de la existencia de fuerzas invisibles a nuestro alrededor. ¿Hay algo más sorprendente de observar que un trozo de hierro atraído misteriosamente por un imán? ¿O sentir una oposición invisible cuando intentamos acercar los polos norte de dos de ellos?

Los chinos conocían este fenómeno. Descubrieron que un trozo alargado de magnetita flotando en un cubo de agua se alineaba en dirección norte-sur. En 376 a.C., el general Huang Ti utilizó esta curiosa propiedad para dirigir a su ejército, pero los chinos no la utilizaron en la navegación marítima hasta novecientos años después. Esta rudimentaria brújula fue importada por los árabes y con ellos pasó a Europa.

Mientras los barcos eran equipados con el nuevo instrumento, Petrus Peregrinus de Maricourt (ca. 1260) investigaba la naturaleza del magnetismo, siendo el primero en descubrir la existencia de las dos polaridades magnéticas, que designó polos norte y sur. En su opinión, las misteriosas fuerzas que obligaban al hierro a moverse hacia el imán eran parecidas a las que impulsaban a los planetas y al Sol a girar en torno a la Tierra. Su obra más famosa, *Epístola sobre el imán* (1269), la escribió mientras estaba acampado con las tropas durante el sitio de Lucera. Se trata de un pequeño gran momento de empirismo en una época caracterizada por una falta casi total de interés por la observación y la experimentación.

> «Las ecuaciones de Maxwell han tenido un impacto mayor en la historia de la humanidad que diez presidentes.»
>
> — Carl Sagan, astrónomo y divulgador estadounidense.

Hubo que esperar a 1600 para que apareciera el que, por méritos propios, es el primer libro científico de importancia en Inglaterra, *Sobre el imán, los cuerpos magnéticos y el Gran Imán, la Tierra*. Por él se considera a su autor, William Gilbert (1544-1603), médico de la reina Isabel I, padre de la ciencia experimental inglesa y a quien debemos la palabra «electricidad», tomada del griego *elektron*. La obra contiene muchos experimentos con hierro y calamitas, numeroso instrumental de laboratorio diseñado por él mismo y profusas refutaciones a creencias erróneas habitualmente admitidas, como la construcción de móviles perpetuos magnéticos. El libro es por entero no matemático en su enfoque y debe gran parte de sus métodos experimentales a Petrus Peregrinus cuya obra, impresa en 1558, Gilbert admiraba. Pero, ante todo, contiene una explicación del comportamiento de la brújula.

Para ello, construyó una piedra imán esférica: la *terrella* —pequeña Tierra—, que le sirvió como modelo de laboratorio para describir el Gran Imán, la Tierra. Gilbert explicó el funcionamiento de la brújula siguiendo las indicaciones de Peregrinus, comparando la dirección en que apuntaba la brújula cuando se cambiaba su

posición sobre la *terrella* con los meridianos, y llamó polos a los puntos en que se encontraban. Gilbert infirió, a partir de las orientaciones de los imanes en la Tierra, que nuestro planeta se comportaba de igual forma que la *terrella*: era el Gran Imán.

Desgraciadamente, los seminales estudios de Gilbert sobre el magnetismo, que pudo realizar gracias a una holgada pensión concedida por la reina —una de las primeras becas de investigación concedidas en la historia—, quedaron anclados y olvidados por espacio de casi dos siglos, pues sus colegas estaban más preocupados por explicar la electricidad.

¿PARA QUÉ SIRVE UN BEBÉ?

Hasta 1819 se creyó que magnetismo y electricidad eran dos fenómenos completamente diferentes. Fue durante el invierno de principios de ese año cuando un profesor de Física de la Universidad de Copenhague llamado Hans Christian Oersted observó, durante una conferencia pública sobre magnetismo, que, al aproximar una brújula a un hilo que conducía electricidad, la aguja cambiaba de dirección y dejaba de apuntar al norte. «Nadie en la audiencia quedó impresionado por ello», comentó tiempo después. Oersted estaba interesado en la posible relación entre ambos fenómenos desde 1807 y su interés por el tema lo dejó claro en 1813, cuando escribió:

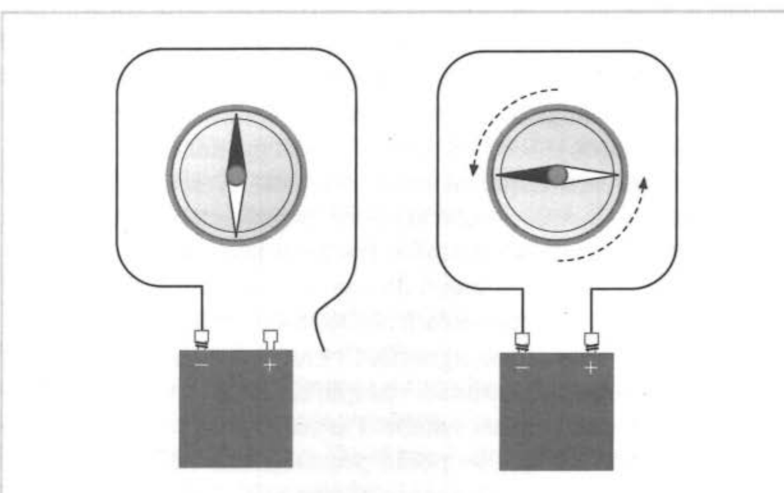
> Es necesario comprobar si la electricidad en su estado más latente realiza algún tipo de acción sobre un imán como tal.

En su artículo del 21 de julio de 1820, Oersted informó a la comunidad científica de su descubrimiento, llamando la atención sobre su dependencia con la distancia y con la posición relativa del hilo y la brújula: la aguja imantada se desviaba siempre que no se pusiera en dirección perpendicular al hilo (véase la figura).

Curiosamente, este sorprendente descubrimiento fue recibido de manera hostil por la ciencia francesa: «es solo otro sueño

alemán», afirmó el físico Pierre-Louis Dulong (1785-1838). Sin embargo, su compatriota François Arago (1786-1853) reproducía el experimento de Oersted en Ginebra y el 11 de septiembre de 1820 lo hacía en la Academia de Ciencias en París. Y no solo eso, sino que descubrió que una espira de cobre por la que pasaba una corriente eléctrica atraía limaduras de hierro que se pegaban a la espira, pero que se desprendían cuando se apagaba el circuito. Cuatro años más tarde, en 1824, encontró que si un disco de cobre se encuentra rotando y se coloca en un pivote sobre él una aguja imantada, esta girará con el disco. Del mismo modo, si se impide que esto suceda (es decir, la aguja se fija), el movimiento del disco tenderá a ralentizarse.

Estos descubrimientos hicieron pensar a André-Marie Ampère (1775-1836) que si la corriente eléctrica se comportaba como un imán era porque, de algún modo, debía ser un imán. Ampère también demostró que dos hilos que transportan corriente eléctrica se repelían o se atraían igual que dos imanes. Determinar exactamente la ley que describía este fenómeno le exigió diseñar un meticuloso programa de trabajo: el problema era muy difícil debido al carácter vectorial tanto de la fuerza involucrada como del campo magnético creado por un elemento de corriente



Experimento de Oersted: al encenderse el circuito la aguja imantada se desplaza colocándose perpendicular a la corriente.

—recordemos que un vector representa una magnitud física definida por el valor que toma, su dirección y su sentido. Así, la velocidad de un coche en el kilómetro 234 de la autovía A-2 es un vector: 90 km/h es su valor (el llamado módulo), la dirección es la calzada y el sentido hacia donde se dirige el coche—. También descubrió que podía potenciar el efecto descubierto por Arago si arrollaba un hilo conductor formando una bobina: acababa de nacer el electroimán. En los años siguientes, Ampère trabajó duramente para obtener una teoría matemática que diera cuenta de los resultados que se habían obtenido hasta entonces. En 1825 publicó su gran obra, *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'experience*, un trabajo que ha sido llamado los *Principia* de la electrodinámica.

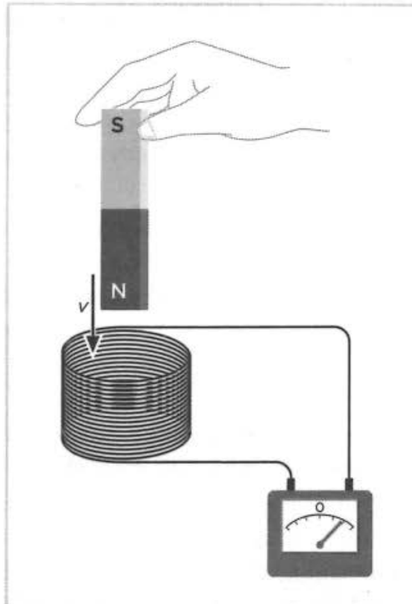
«La investigación experimental que estableció la ley de Ampère de la acción mecánica entre corrientes eléctricas es uno de los logros más brillantes de la ciencia.»

— James Clerk Maxwell, en *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873).

Ampère negó de este modo la teoría de los dos fluidos —eléctrico y magnético— en favor de la existencia de uno solo. Pero quizá su conclusión de mayor impacto fue que un imán es únicamente un conjunto de corrientes eléctricas, o dicho de otro modo, que las fuerzas magnéticas solo eran expresión del movimiento circular de fluidos eléctricos alrededor del eje del imán. Una afirmación controvertida que su amigo Augustin Fresnel (1788-1827) intentó probar mediante una serie de ingeniosos experimentos. Pero en 1821, ante los repetidos fracasos por observarlas, Ampère asumió la idea de Fresnel de que esas corrientes eran moleculares. Lo que subyacía en esta hipótesis era que el magnetismo permanente y el electromagnetismo eran dos caras del mismo fenómeno. No todo el mundo compartía esta visión; entre sus más famosos detractores estaba Faraday. Fresnel incluso fue más allá, al afirmar que se podía producir una corriente en un circuito que estuviera adyacente a otro por el que sí circulaba

una corriente eléctrica. No lo consiguió y se tuvo que esperar una década para poder observarlo.

En 1831, el que había sido ayudante de Davy, Michael Faraday, era director del laboratorio de la Royal Institution. Ese año, el más fructífero de toda su vida, demostró en una serie de ingeniosos y brillantes experimentos que se podía inducir una corriente eléctrica en una bobina de cobre mediante un imán. El detalle crítico para poder hacerlo, y que Faraday casi descubrió por casualidad, fue que la corriente solo se producía si se *movía* el imán en presencia del hilo. Si dejaba quieto el imán junto al hilo, no se medía nada (véase la figura). La manera más simple de visualizarlo es imaginar una espira circular de hilo conductor. Si metemos y sacamos el imán por el centro de la espira, con instrumental apropiado —un amperímetro— mediremos paso de corriente eléctrica. En el momento en que dejemos de hacerlo, se acabará la producción de corriente. Lo mismo ocurría si enfrentaba dos espiras de cobre: únicamente cuando encendía o apagaba el circuito en una de ellas, aparecía una corriente inducida en la otra. El hallazgo de la inducción magnética fue uno de los grandes logros de este científico autodidacta.



El gran descubrimiento de Faraday: solo cuando se mueve un imán se induce una corriente eléctrica. Si se deja quieto no se produce nada.

Con estos descubrimientos se demostró que magnetismo y electricidad no eran sino aspectos de un mismo fenómeno. La anécdota, que siempre persigue a todo gran descubrimiento científico, surgió cuando Faraday presentó sus hallazgos en una conferencia abierta al público. En el turno de preguntas, una señora, muy victoriana ella, le preguntó:

Señor Faraday, ¿para qué sirve todo eso que nos ha contado?

A lo que Faraday replicó:

Señora, ¿y para qué sirve un recién nacido?

Aunque otra versión de esta historieta apócrifa dice que le contestó:

Señora, dentro de unos cuantos años pagará impuestos por esto.

ÉTER Y LÍNEAS DE FUERZA

Ampère redujo el magnetismo al movimiento de corrientes moleculares e intentó explicar la fuerza que una espira ejercía sobre otra debido a vibraciones en el éter, que veía como un fluido sutil y neutro formado por la combinación de dos fluidos eléctricos. Este modelo de materia, con su carga de entidades hipotéticas y casi fantasmales, era algo difícil de tragar para el espíritu experimental de Faraday, que siempre mantuvo una respetuosa distancia con Ampère: reconoció su importante trabajo experimental, pero mantuvo un fuerte escepticismo respecto a sus planteamientos teóricos.

Michael Faraday ha pasado a la historia de la ciencia como uno de los mejores científicos experimentales de todos los tiempos, pero no podemos olvidar que también fue uno de los más importantes teóricos del siglo XIX, un hecho que ha sido oscurecido por su total falta de conocimiento matemático; como dijera un colega suyo, las matemáticas eran para él un libro cerrado. Eso no excluye su tremenda intuición en este tema, como queda puesto de manifiesto en una de sus obras maestras, *Experimental Researches in Electricity*. Faraday nunca fue cauto a la hora de generalizar a partir de sus cuidadosos experimentos, pero en sus análisis finales, y como buen experimentador que era, nunca utilizó hipótesis que no estuvieran bien fundadas en los resultados obtenidos en su laboratorio.

Fue esta ausencia de matemáticas lo que hizo que Maxwell en un principio rechazara a Faraday y su forma de hacer física, pero pronto se dio cuenta de su error. La lectura de sus *Experimental Researches* le dejó deslumbrado por su apertura de mente y su integridad:

> Faraday... nos muestra tanto sus experimentos fallidos como los exitosos, sus ideas en bruto como las más elaboradas y el lector, aunque inferior a él en su capacidad inductiva, siente simpatía e incluso más que admiración, y está tentado a creer que, si tuviera la oportunidad, él también sería un descubridor.

Entre 1831 y 1838, la vida de Faraday fue extraordinariamente activa y completó la primera de las catorce series de *Experimental Researches*. La mayor parte del tiempo de este período lo dedicó a la electroquímica, pero siguió interesado en entender la naturaleza de la electricidad. Fue entre 1831 y 1833 cuando llegó a la conclusión que todos los tipos de electricidad conocidos hasta entonces (estática, galvánica, termoeléctrica...) eran la misma y, sobre todo, que la electricidad no era una sustancia. Por desgracia, en 1839 enfermó gravemente y durante seis años no pudo trabajar. En 1845 retomó sus investigaciones con un objetivo en su mente: determinar la naturaleza de las interacciones eléctricas y magnéticas. Estaba convencido de que estas se verificaban a través de unas líneas de acción que llenaban el espacio, como un entramado espeso de redes que transmitían las fuerzas, ya fueran eléctricas, magnéticas o incluso gravitatorias. También estaba convencido de que la luz, la electricidad y el magnetismo estaban relacionados, que el supuesto éter no existía y que las líneas de fuerza que él postulaba tenían una existencia real, independiente de su fuente; no sin motivos, al colocar papel con limaduras de hierro bajo un imán, aquellas se alinean formando unas «líneas» que van del polo norte al polo sur.

En 1852, con más de sesenta años, resumió sus ideas en el artículo titulado «On the Physical Character of the Lines of Force». En él negaba categóricamente lo que la mayoría de los científicos —con los franceses Ampère y Poisson a la cabeza— defendían:

que las cargas eléctricas y los imanes actuaban unos sobre otros a distancia y nada sucedía en el espacio que había entre ellos. Esta visión era parte de lo que se creía que había dicho el gran Newton, negando que la gravedad pudiera actuar a través de algún tipo de medio. Curiosamente, Newton pensaba justo lo contrario, tal y como explicó en una carta a su amigo Richard Bentley:

> [...] que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de nada más [...] es algo tan absurdo para mí que creo que ningún hombre que sea intelectualmente competente para pensar sobre temas filosóficos pueda aceptar semejante cosa.

Faraday, sin saberlo, fue el heredero de esta línea de pensamiento de Newton totalmente olvidada, al creer que las cargas eléctricas y los imanes llenaban el espacio con líneas de fuerza que interaccionaban con las que surgían de las otras cargas e imanes. Muchos criticaron este enfoque. Entre ellos estaba el astrónomo real George Airy, que sacó a pasear su afilada lengua para vituperarlo:

> Me cuesta imaginar que alguien que conozca práctica y numéricamente el acuerdo [entre los cálculos basados en la acción a distancia y los resultados experimentales] pueda dudar ni un solo instante entre, por un lado, esta acción simple y precisa, y algo tan vago y variable como las líneas de fuerza por el otro.

Faraday hizo caso omiso de estos ataques y siguió desarrollando sus ideas. Fruto de ello fue su famoso artículo «On Regelation, and On the Conservation of Force» de 1859, en el que analizaba el problema de la interacción entre dos cuerpos. Si solo hay uno, no aparece ningún tipo de atracción, pero en el momento en que se introduce otro, la teoría clásica exigía la aparición instantánea de una fuerza sobre el segundo. Esta era una idea que no gustaba nada a Faraday. Para él era más fácil de asumir la existencia de una cierta «tensión» en el espacio, representada por líneas de fuerza asociadas a la materia. Ahora bien, todas estas ideas estaban cojas si no se formulaban matemáticamente, de manera que pudieran obtenerse resultados cuantitativos; esta fue la labor de

Maxwell, que había empezado a darse cuenta de que la noción de las líneas de fuerza era mucho más que una idea, se trataba de una teoría muy seria. El problema era por dónde empezar.

Por suerte, William Thomson, mientras era un estudiante en la Universidad de Cambridge, había hecho un extraordinario descubrimiento: las ecuaciones que describen la intensidad y la dirección de la fuerza electrostática —la que aparece cuando se enfrenta dos cargas que están en reposo y que es descrita por la ley de Coulomb— tenían la misma forma matemática que las que describen el ritmo y la dirección de un flujo estacionario de calor a través de un sólido. ¿No era una locura asociar una fuerza estática con un flujo en movimiento? Por supuesto que sí, pero Maxwell tenía más interés por conocer el verdadero funcionamiento de la naturaleza que en labrarse una reputación. Así que, por muy estrafalario que fuera, iba a explorar a dónde le llevaba esta idea. James escribió en tono jocoso a Thomson que iba a «poner a pochar tus conservas eléctricas».

James necesitaba de una potente analogía que le permitiera entender mejor el problema de las líneas de fuerza. La que escogió fue la de un fluido sin peso e incompresible que podía discurrir por un medio poroso: las líneas de flujo representarían las líneas de las fuerzas magnéticas o eléctricas, mientras que la porosidad representaría las propiedades físicas de los materiales en juego.

Para Faraday, las líneas de fuerza eran algo así como tentáculos; James las convirtió en un continuo, presentes en cada punto del espacio, de forma que una mayor densidad de flujo significaba que la fuerza eléctrica o magnética era más intensa. Siguiendo con su analogía, si lo que hacía mover a un fluido eran las diferencias de presión entre dos puntos —el viento sopla, por ejemplo, de las zonas de alta presión a las de baja— y el flujo es proporcional al gradiente de presiones, las diferencias de potencial eléctrico o magnético debían ser proporcionales a la intensidad del campo.

Maxwell fue construyendo su analogía para dar cuenta de todas las características de la electrostática y de la magnetostática: las cargas positivas y negativas eran fuentes y sumideros del campo eléctrico y los materiales con diferentes susceptibilidades eléctricas o magnéticas medios de distinta porosidad. Todo iba

encajando y la formulación matemática resultante no solo coincidía con la que se derivaba de la hipótesis de la acción a distancia, sino que también daba cuenta de lo que sucedía en la frontera entre dos materiales con distintas propiedades eléctricas y magnéticas y que hasta ese momento carecía de explicación.

El concepto clave a todo este desarrollo era que el fluido era incompresible: cada centímetro cúbico de espacio siempre contenía la misma cantidad de fluido, independientemente de la velocidad a la que se moviese. De este modo, se deducía fácilmente que las fuerzas electromagnéticas variaban con el inverso del cuadrado de la distancia, tal y como se observaba.

«La teoría de la relatividad se debe en sus orígenes a las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético.»

— Albert Einstein.

Una vez aclaradas sus ideas, Maxwell atacó otras dos leyes que se encontraban firmemente asentadas en la experimentación: una calculaba la fuerza magnética total producida por una espira que transportaba corriente eléctrica; la otra, la cantidad de corriente eléctrica producida en una espira por un flujo magnético variable. James se dio cuenta de que la única forma de dar una descripción matemática conjunta de ambas era mirando lo que sucedía en una diminuta porción de espacio. Matemáticamente, eso significaba reformular las leyes en forma diferencial, usando vectores en cada punto del espacio en lugar de sumar cantidades a lo largo de toda la espira. Cuando lo hizo, apareció de manera natural uno de los conceptos más abstrusos introducidos por Faraday, el estado electrotónico, que hoy se conoce como el potencial vector: su tasa de variación en un punto del espacio (matemáticamente, su rotacional) da la densidad de flujo magnético en cada punto y su variación en el tiempo hace aparecer una fuerza electromotriz, generadora de una corriente eléctrica.

A Maxwell le había aparecido en sus ecuaciones una cantidad que mientras se mantuviera constante no producía ningún efecto, pero en el momento en que variaba en el espacio o en el

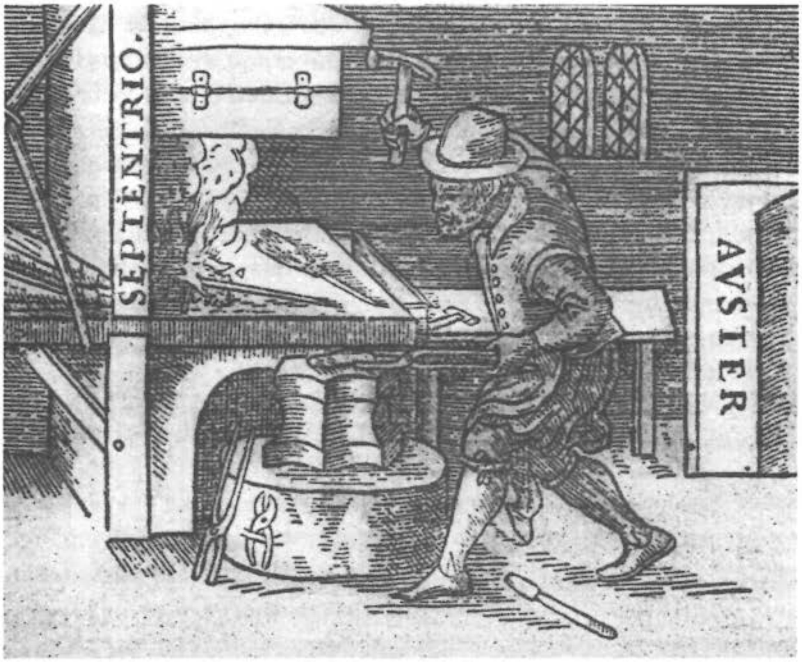
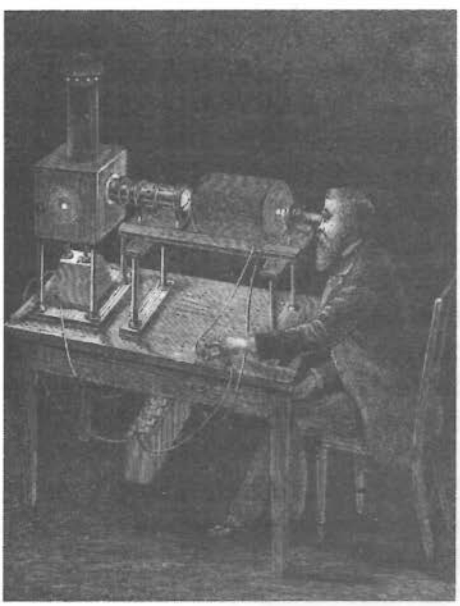


FOTO SUPERIOR:
Grabado que muestra a William Gilbert magnetizando barras de hierro. En su obra *Sobre el imán, los cuerpos magnéticos y el Gran Imán, la Tierra* (1600), Gilbert reunió sus investigaciones sobre cuerpos magnéticos y atracciones eléctricas.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Alrededor de 1860: Maxwell, investigando el magnetismo, la luz y las corrientes moleculares.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Maxwell en la década de 1860.





tiempo, daba origen a fuerzas eléctricas o magnéticas. Era todo un éxito, pero había una pega: no sabía cómo interpretarlo físicamente, incluso en función de la analogía que estaba utilizando. En el invierno de 1855-56, James leía en la Cambridge Philosophical Society su primera gran contribución al electromagnetismo. En un artículo titulado «On the Faraday's Lines of Force», explicaba con ellas los fenómenos electromagnéticos estáticos. En su exposición tuvo cuidado de enfatizar que su analogía con un fluido en movimiento no tenía un significado físico, sino que únicamente era «una ayuda al pensamiento». Faraday le agradeció el esfuerzo que había realizado y le confesó que «al principio me asusté cuando vi la cantidad de fuerza matemática relacionada con el tema».

EN EL KING'S COLLEGE

Recién llegados de Escocia, los Maxwell se instalaron en Londres en una casa del distrito de Kensington, en el número 8 de Palace Gardens, a unos 6,5 km del *college*. Tenían cerca los jardines de Kensington y Hyde Park, donde Katherine podía montar a su poni, Charlie, que también había hecho un largo viaje en tren desde Glenlair hasta la cosmopolita Londres.

El King's College se había fundado en 1829 como alternativa anglicana al University College, situado a un kilómetro y medio al norte, el cual, a su vez, se había fundado en 1826 como alternativa a las universidades de tradición estrictamente religiosa de Oxford y Cambridge. Por supuesto, su llegada como nuevo profesor implicaba impartir una clase inaugural. Al igual que hiciera en Aberdeen, aquí también insistió en que lo que quería era que sus alumnos aprendieran a pensar por sí mismos:

> En esta clase espero que no solo aprendan resultados, o fórmulas aplicables a situaciones que puedan aparecer en la práctica, sino los principios de los que esas fórmulas dependen y sin los cuales no son más que basura mental.

Y terminó su clase con un párrafo extrañamente profético:

> Al final de todo tenemos las ciencias Eléctricas y Magnéticas, que tratan de ciertos fenómenos de atracción, calor, luz y acción química, dependiendo de las condiciones de la materia, y de la cual solo poseemos un conocimiento parcial y provisional. Se han recogido una inmensa cantidad de hechos que deben ser reducidos a un orden y expresados como resultados de una cierta cantidad de leyes experimentales, pero la forma bajo la que estas leyes deben aparecer, deducidas de principios centrales, es algo todavía incierto. La generación actual no tiene derecho a quejarse de que ya se han hecho los grandes descubrimientos, como si no hubiera nada más que investigar. En realidad, solo han ampliado la frontera de la ciencia.

De este modo, Maxwell criticaba a todos aquellos que creían que quedaba ya muy poco por saber de la naturaleza. Cuatro años más tarde, él mismo iba a demostrar que no era así, al formular una de las teorías más importantes de toda la física.

Y comenzó el curso. La cara lectiva en el King's era un poco menor que en Aberdeen, pero el período académico duraba dos meses más. También debía impartir clases vespertinas para los trabajadores todas las semanas, algo que estaba incluido entre las obligaciones de los profesores del *college*.Una semana antes de cumplir treinta años, Maxwell fue elegido miembro de la Royal Society en reconocimiento a su trabajo sobre la teoría de los colores y los anillos de Saturno. De este modo, se le daba formalmente la bienvenida a este selecto grupo que componían los mejores científicos del Imperio británico. Pero algo todavía rondaba por su mente, una sensación de haber dejado un trabajo incompleto.

Hacía cinco años que había publicado su trabajo sobre el electromagnetismo y tenía la idea de que faltaba algo: había derivado todas las fórmulas que explicaban lo que sucedía con los campos eléctrico y magnético estáticos, y gracias a su analogía del flujo de calor también había conseguido introducir en ese esquema las corrientes eléctricas constantes en el tiempo. Pero quedaban fuera todos aquellos fenómenos en los que había algún cambio, cuando

las magnitudes relevantes empezaban a depender del tiempo. En este caso, su analogía era totalmente inútil.

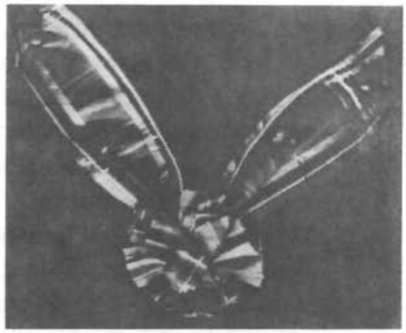
Ante sí solamente tenía dos opciones: abandonar el camino marcado por Faraday y volver a la misteriosa acción a distancia, o ir más allá de la pura analogía e imaginar un modelo mecánico para el campo electromagnético, un mecanismo que se comportara exactamente igual que la realidad. Ese modelo debía dar cuenta de los cuatro efectos conocidos hasta la fecha: las fuerzas entre cargas eléctricas en reposo, las fuerzas entre polos magnéticos, el campo magnético que crea una corriente circular y la corriente eléctrica que crea un campo magnético cambiante en una espira. Esta vez, su objetivo no era encontrar una alegoría, sino un modelo físico como el que había descrito en «Illustrations on the Dynamical Theory of Gases». Y su inspiración llegó, otra vez, de la mano de Thomson.

REMOLINOS MOLECULARES

Thomson había intentado explicar cierto fenómeno descubierto por Faraday, donde un campo electromagnético influía en las características de la luz (el llamado «efecto magneto-óptico»), diciendo que las líneas de fuerza de Faraday eran ejes de rotación del éter, ese fluido sutil que se creía llenaba el espacio. Las vibraciones que se suponía constituían la luz interactuaban con este movimiento circular de los elementos del éter cuyo eje era paralelo al campo magnético.

Este planteamiento despertó el interés de Maxwell y en noviembre de 1857 escribió a Faraday explicando que pretendía encontrar una generalización de la teoría de Thomson que le llevara a «una posible confirmación de la naturaleza física de las líneas de fuerza magnéticas». Así comenzó su búsqueda de lo que llamaría la teoría de los vórtices moleculares. En enero de 1858 escribió a Thomson que estaba convencido de que el «magnetismo consiste en la revolución o rotación de algún tipo de material», y continuó describiendo el diseño de un experimento con un imán en rotación

LA PRIMERA FOTOGRAFÍA EN COLOR



La primera fotografía con color permanente —a la que se llamó Tartan Ribbon—, tomada en 1861 por Thomas Sutton bajo las indicaciones de James Clerk Maxwell.

En mayo de 1861, la Royal Institution invitó a Maxwell a dar una charla sobre su teoría de los colores. En lugar de hablar de los principios, James decidió que sería mejor hacer una demostración de cómo a partir de los tres colores primarios podía generarse cualquier otro. Para ello, había diseñado una caja que era capaz de mezclar dos colores del espectro de la luz, pero solo podía mirar a través de ella una única persona. Aunque había otra posibilidad: tomar tres fotografías del mismo objeto usando un filtro verde, otro rojo y otro azul y proyectarlas simultáneamente y superpuestas usando los mismos filtros. Solo había un problema: las placas fotográficas de la época eran sensibles al azul, pero muy poco al rojo. Aun así merecía la pena intentarlo. En el King's tenía un colega, Thomas Sutton (1819-1875), que era un experto fotógrafo y le dijo que le echaría una mano. Tomaron tres fotografías de una cinta de tela escocesa, las superpusieron y se vio maravillosamente: la audiencia que asistió ese día a la Royal Institution pudo ver la primera fotografía en color de la historia. Y lo más sorprendente: nadie más pudo repetir el resultado hasta muchos años después. ¿Cómo es posible? Los expertos de los laboratorios Kodak resolvieron el enigma un siglo más tarde. Según ellos, el experimento de Maxwell nunca debió funcionar porque la placa fotográfica era totalmente insensible a la luz roja. Si tuvo éxito fue por una serie encadenada de afortunadas coincidencias. Por un lado, el tinte rojo de la cinta, además del color rojo, reflejaba algo de luz ultravioleta y la solución de Sutton para el filtro rojo dejaba pasar exactamente la luz en esa misma región del espectro ultravioleta. Además, la emulsión usada en las placas no era en absoluto sensible al color rojo, sino al ultravioleta. Lo que realmente había pasado era que la fotografía obtenida con el color rojo había sido obtenida en un rango del espectro invisible al ojo humano: el ultravioleta.

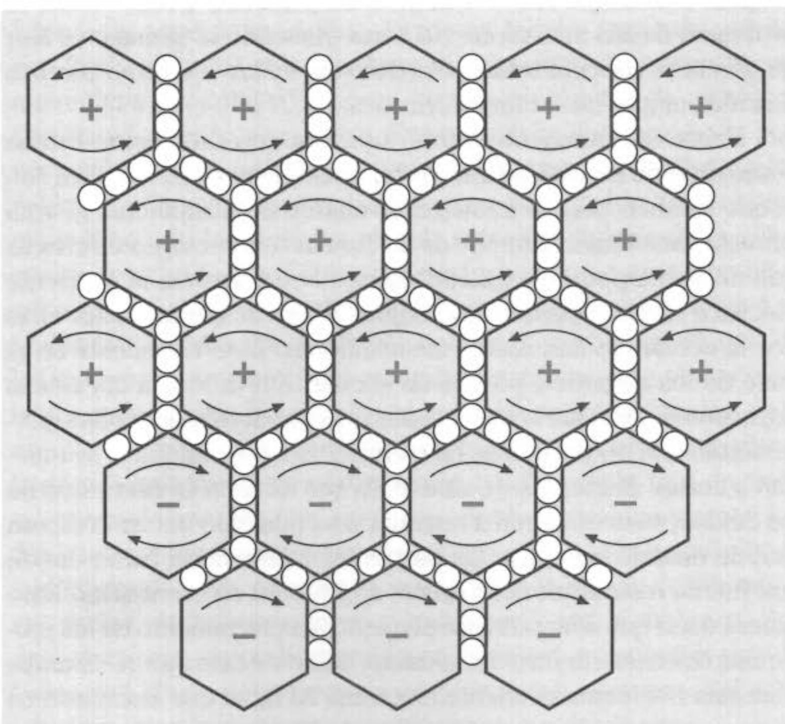
libre, que construyó en 1861, con el objeto de detectar esos vórtices: «no he encontrado ninguna prueba de ello», confesó a Thomson en diciembre de ese mismo año.

Meses antes, entre marzo y mayo, publicó las dos partes de su artículo «On Physical Lines of Force» en la revista *Philosophical Magazine*. Su gestación fue larga y silenciosa, pues no mencionó nada de él en su correspondencia desde enero de 1858 a octubre de 1861, después de su publicación.

Maxwell postuló la existencia de cierto mecanismo físico que servía como sustrato al campo electromagnético. En esencia, supuso que todo el espacio estaba lleno de diminutas celdas esféricas empaquetadas compactadamente, de densidad muy baja y capaces de rotar (véase la figura, donde se han sustituido las celdas esféricas por hexagonales para ganar claridad en el dibujo). Fijémonos en una de ellas. Cuando gira la fuerza centrípeta cambia su forma, ensanchándose por el ecuador y contrayéndose a lo largo del eje de rotación, del mismo modo que le sucede a nuestro planeta. Por supuesto, al expandirse por su zona media, empujará al resto de las celdas que la rodean. Ahora bien, si todas rotan en el mismo sentido el efecto conjunto que observaremos es que el sistema ejerce una *presión* efectiva (empuja) en la dirección perpendicular al eje de rotación. Si miramos el eje de rotación vemos que ocurre exactamente lo contrario. Como por los polos tienden a contraerse, se puede interpretar que aparece una *tensión*. Por tanto, si todas las celdas están alineadas en el espacio, el eje de rotación y la dirección perpendicular al mismo se comportarán como las líneas de fuerza postuladas por Faraday: aparecerá una fuerza atractiva a lo largo del eje de rotación y una repulsiva en las direcciones perpendiculares a la misma. Y aún más, como esas celdas pueden girar en sentido horario o antihorario, ambas situaciones permiten definir los dos sentidos en el campo (representados por los signos + y – en la figura).

En este punto, Maxwell se enfrentó a un pequeño problema: el hierro y la madera no se comportan de la misma forma en presencia de un imán. ¿Cómo reflejar esta diferencia? James se dio cuenta de que las diferentes susceptibilidades magnéticas se podían incluir en el modelo simplemente cambiando la densidad de las celdas: en términos mecánicos quería decir que la alta susceptibilidad magnética del hierro era equivalente a hacerlas más densas si se encontraban en presencia de este metal.

Ya tenía construido su modelo: los ejes de rotación de las celdas definían la dirección del campo magnético en cualquier punto del espacio, y su densidad y velocidad de rotación, la intensidad del mismo. Ahora bien, ¿qué ponía estas celdas en rotación? Es más, como puede verse en la figura, que dos celdas adyacentes giren en el mismo sentido hace que sus superficies —que se encuentran en contacto por presentar un empaquetamiento compacto— rocen entre sí en sentidos contrarios, lo que acabaría deteniendo la rotación. Para salvar este problema, James supuso que entre las células había otras partículas más pequeñas, que actuaban como unos cojinetes. Maxwell supuso que esos «cojinetes» eran partículas eléctricas, por lo que tenemos que, en presencia de una fuerza electromotriz, tenderán a moverse a lo largo de los canales entre las células: ha aparecido una corriente eléc-



Modelo mecánico de vórtices moleculares hexagonales que Maxwell utilizó para explicar los fenómenos electromagnéticos.

trica. Y resulta evidente que este desplazamiento de nuestros peculiares «cojinetes» es lo que provoca que las células entren en rotación.

Con este modelo Maxwell fue capaz de explicar los fenómenos electromagnéticos. Por ejemplo, si las partículas eléctricas —los cojinetes— se desplazasen por los canales sin rotar, las células de ambos lados empezarían a girar en sentidos contrarios, que es exactamente lo que sucede cuando se crea un campo magnético alrededor de un hilo que transporta corriente eléctrica. El único fenómeno que quedaba fuera del alcance de su modelo era lo que sucedía cuando dos cargas eléctricas estáticas se repelían.

James estaba contento con el resultado, pero no demasiado: no había podido obtener una teoría completa, que era su principal objetivo. Aún había fenómenos que se le escapaban. Quizá pasar las vacaciones de verano en Glenlair y dedicarse a los problemas propios del campo le serviría para despejarse y poder atacar el problema meses más tarde. No tenía planeado ni trabajar ni leer ningún libro sobre el tema, pero no pudo evitar que en su cerebro una idea empezase a tomar forma.

Hasta este momento había supuesto que cada celda rotaba como un todo sin disipar energía. Esto implica que el material con el que estaban hechas debía tener una cierta elasticidad. ¿Podía ser esta elasticidad la fuente de las fuerzas entre cargas eléctricas que no había podido explicar? En los conductores, la corriente eléctrica aparece porque los «cojinetes» se desplazan entre ellas por la acción de una fuerza electromotriz. Esto no sucede en el caso de los aislantes, porque se encuentran unidos a las celdas adyacentes. Pero las celdas elásticas se pueden distorsionar, permitiendo que las partículas de electricidad, los cojinetes, se muevan a cortas distancias. ¿Cuánto? Lo que dé de sí la distorsión de las celdas, pues tenderán a regresar a su posición inicial como un muelle cuando se estira: las partículas se moverán hasta donde esa fuerza restauradora se iguale a la fuerza electromotriz. Esto quiere decir que aparecerá un pequeño desplazamiento de las partículas eléctricas dentro del aislante; dicho de otro modo, estamos ante una brevísima corriente eléctrica. Al igual que sucediera en el caso magnético, la susceptibilidad eléctrica de las sustancias

quedaba reflejada en el modelo como una elasticidad variable de las celdas: a mayor susceptibilidad, más elásticas se vuelven las celdas y esta corriente de desplazamiento se hará mayor.

Maxwell acababa de predecir un fenómeno totalmente nuevo: que podían medirse pequeñas corrientes eléctricas en aislantes, e incluso en el espacio vacío. Este nuevo tipo de corriente aparecería si el campo eléctrico variaba, y lo llamó «corriente de desplazamiento».

> «Bienaventurado es el hombre que puede reconocer en el trabajo de hoy una porción conectada de la obra de la vida y una forma de realización de la obra de la eternidad.»
>
> — James Clerk Maxwell.

Al introducir este concepto en las ecuaciones, todo empezaba a tener un aspecto magnífico. Pero aún faltaba algo más por llegar. Todo material elástico tiene la capacidad de transmitir un movimiento ondulatorio, como sucede en el agua de un estanque cuando se tira una piedra. En su modelo, una minúscula perturbación en una columna de sus «cojinetes» haría vibrar a las celdas contiguas, lo que generaría una perturbación en el campo magnético a lo largo de los ejes de rotación de las celdas. ¿Qué quería decir todo esto? Que toda perturbación en el campo eléctrico provocaba una similar en el magnético, y viceversa. Las ondas provocadas por cualquier tipo de perturbación en uno de los campos se transmitirían en ambos: estamos ante ondas electromagnéticas. Es más, se trataba de ondas transversales, esto es, que la vibración se verificaba en la dirección perpendicular a la de propagación de la perturbación. ¿Había algún tipo de onda transversal conocida que, además, estuviera relacionada con los fenómenos electromagnéticos? ¡Por supuesto que la había! ¡Era la luz! Maxwell debía calcular la velocidad a la que se desplazaban sus ondas electromagnéticas y compararla con la de la luz. Por desgracia, eso no podía hacerlo en Glenlair, pues había dejado todos sus libros de referencia con los datos que necesitaba en Londres: cuando regresara en octubre se pondría a ello.

UNA NUEVA TEORÍA

Ya en su despacho de Londres, Maxwell no pudo esperar: con los mejores datos experimentales a su alcance, calculó que sus ondas electromagnéticas viajaban a una velocidad de 310 740 km/s. El francés Fizeau había medido la velocidad de la luz en el aire y obtenido 314 850 km/s. Ambas cantidades eran demasiado parecidas para ser una coincidencia: la luz debía ser una onda electromagnética.

Maxwell decidió ampliar su artículo «On Physical Lines of Force» con dos partes nuevas, que aparecieron en 1862. En la tercera se ocuparía de la electrostática e introduciría la corriente de desplazamiento y las ondas electromagnéticas. En la cuarta usaría su modelo para explicar el fenómeno descubierto por Faraday de cómo la luz cambia su plano de vibración (su polarización) al atravesar un campo magnético.

Propuesto como una teoría física a las líneas de fuerza de Faraday, el modelo de los vórtices moleculares había evolucionado de filamentos en un fluido, a celdas en rotación, y de ahí a celdas elásticas. En uno de los más sorprendentes resultados de la historia de la física, la hipótesis de los vórtices demostró ser de lo más productiva. En este caso, el empeño de Maxwell por idear analogías físicas de los fenómenos naturales le había resultado mucho más provechoso que en el caso de la teoría cinética de los gases. Únicamente había una cuestión bastante molesta, aunque era de índole filosófica: la validez general de estos resultados estaba ligada a un modelo mecánico del éter. Y esto no le gustaba nada.

Ya en diciembre de 1861, antes de que publicara las dos partes finales del artículo, Maxwell escribió a un amigo de Cambridge:

> [...] estoy intentando encontrar una expresión matemática exacta para todo lo que es conocido sobre electromagnetismo sin la ayuda de hipótesis.

En el artículo había considerado que la «hipótesis de los vórtices» era «probable», pero el modelo del éter con celdas en rotación y partículas-cojinetes era muy «incómodo», «una hipótesis

provisional y temporal». Maxwell había decidido dejar a un lado su modelo y utilizar únicamente los principios de la dinámica, las leyes matemáticas que gobiernan la materia y el movimiento. Para deducir las ecuaciones del electromagnetismo sin usar su modelo molecular, necesitaba un método que había desarrollado en el siglo XVIII el francés Joseph-Louis Lagrange, descrito en su *Mécanique analytique*. El punto fundamental para James era que ese método permitía analizar un sistema tratándolo como si fuera una caja negra, sin necesidad de conocer cómo funciona por dentro. La naturaleza exacta del mecanismo subyacente podía quedar oculta, pero si el sistema seguía las leyes de la dinámica, Maxwell podría deducir las ecuaciones que rigen los procesos electromagnéticos sin la ayuda de ningún tipo de modelo.

El objetivo era realmente formidable: ampliar la dinámica de Lagrange al electromagnetismo. Para poder hacerlo tuvo que echar mano de un concepto introducido una década antes por su amigo Thomson: la energía y su principio de conservación. Con él, su pericia matemática y varios años de trabajo consiguió culminar el gran artículo «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field», que dividió en siete partes y lo presentó en una reunión de la Royal Society en diciembre de 1864. En él describía lo que denominó la «teoría electromagnética de la luz», y según confesó a uno de sus asistentes en una carta en septiembre de ese año:

> [...] he limpiado la teoría de toda suposición injustificada, luego podemos determinar la velocidad de la luz midiendo la atracción entre cuerpos que se encuentran a una determinada diferencia de potencial.

Fue en el resumen que encabeza todo artículo científico donde Maxwell hizo la afirmación más enfática de lo que implicaba su recién forjada teoría:

> ¿Qué es la luz de acuerdo con la teoría electromagnética? Consiste en variaciones magnéticas transversales rápidas y alternadas, acompañadas por desplazamientos eléctricos, donde la dirección de estos desplazamientos es perpendicular a las perturbaciones magnéticas, y ambas son a su vez perpendiculares a la dirección del rayo.

LA CONFIRMACIÓN



El físico alemán Heinrich Hertz.

En 1888, un profesor de Física alemán llamado Heinrich Hertz (1857-1894) enseñaba a sus alumnos la confirmación experimental de las teorías de James Clerk Maxwell. Una mañana de ese mismo año, Hertz llevó a su clase un par de instrumentos diseñados y construidos por él mismo. Uno de ellos era un emisor de ondas electromagnéticas y el otro era un receptor. Puso cada uno en una esquina de la clase y como claramente había predicho el genio de Escocia, Hertz hizo saltar una chispa en el receptor al encender el emisor. Como si de un truco de magia se tratara, Hertz había enviado una onda electromagnética misteriosa y sutil que provocó el chispazo en el otro circuito. Si lo pensamos detenidamente, que un circuito eléctrico provoque un chispazo en otro separado casi una decena de metros nos tiene que parecer pura y simple magia. Tras la demostración, uno de sus estudiantes le preguntó si eso tendría algún día un uso práctico. Hertz contestó:

> De ninguna manera. Esto es simplemente un interesante experimento de laboratorio que prueba que Maxwell tiene razón. No veo ninguna aplicación para esta misteriosa e invisible energía electromagnética.

Heinrich Hertz era un gran físico, pero un pésimo profeta. Si no hubiera muerto en 1894, cuando solo contaba con treinta y seis años, se habría dado cuenta de su error, dado que justo al año siguiente otro joven italiano, Guglielmo Marchese Marconi (1874-1937), utilizando el instrumento diseñado por Hertz, transmitía y recibía un mensaje en casa de su padre en Bolonia.

Así empezaba el artículo:

La teoría que propongo podría llamarse una teoría del campo electromagnético, porque tiene que ver con el espacio situado en la vecindad de los cuerpos eléctricos y magnéticos, y puede llamarse una teoría dinámica porque supone que en el espacio hay materia

en movimiento, que es la que produce los fenómenos electromagnéticos observados.

No hace falta que prolonguemos por más tiempo el misterio de cuáles son las ecuaciones obtenidas. Expresadas en lenguaje moderno son:

En el vacío	Caso general
$\vec{\nabla}\cdot\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla}\cdot\vec{D}=\rho$
$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0$	$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0$
$\vec{\nabla}\cdot\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$	$\vec{\nabla}\cdot\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$
$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=\mu_0\vec{J}+\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$	$\vec{\nabla}\cdot\vec{H}=\vec{J}+\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$

E es la intensidad de campo eléctrico y *D* el desplazamiento eléctrico, una magnitud asociada a aquella a través de una constante llamada permitividad eléctrica del medio que atraviesa, que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. *B* es la densidad de flujo magnético, *H* la intensidad de campo magnético relacionada con *B* esta vez a través de la permitividad magnética. Finalmente, *J* es la densidad de corriente.

La primera de las ecuaciones es la ley de Gauss, que describe el flujo de campo eléctrico (la cantidad de líneas de fuerza) que atraviesa una superficie cerrada en el espacio. Si en el interior de esa superficie no hay ninguna carga eléctrica, se tiene que $\nabla\cdot E=0$. La segunda ecuación es la ley de Gauss para el campo magnético y nos dice que es imposible encontrar un polo norte o un polo sur magnético aislado: siempre se dan por parejas.

La tercera es la ley de Faraday, que nos dice que el voltaje eléctrico inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético. La cuarta es la ley de Ampère, que establece que una corriente eléctrica estacionaria genera un campo magnético estático. Esta es la que Maxwell corrigió al introducir la corriente de desplazamiento antes mencionada.

En el caso de un vacío sin cargas ni corrientes eléctricas, las ecuaciones quedan como:

$$\nabla \cdot E = 0$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot B = \frac{1}{c^2}\frac{\partial E}{\partial t},$$

que toman la forma de una onda electromagnética viajando por el espacio y donde

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}},$$

con ε_0 y μ_0 las permitividades eléctrica y magnética del vacío respectivamente.

Estas ecuaciones resumen todos los fenómenos electromagnéticos y son válidas a todas las escalas. Pero, como suele suceder cuando se presenta una gran teoría cuyo alcance está mucho más allá de la comprensión de los científicos de la época, nadie le hizo mucho caso ni entendió que se encontraba ante una verdadera revolución científica.

CAPÍTULO 8

El Cavendish

Maxwell había conseguido
ganarse una excelente reputación como físico
experimental, aunque algo excéntrico por su «extraña»
teoría electromagnética, que muy pocos entendían. Fue
entonces cuando le ofrecieron ser el director de un nuevo
centro de investigación que se iba a construir en
Cambridge, el laboratorio Cavendish, que estaba
llamado a convertirse en luminaria
de las ciencias físicas.

En el verano de 1865, Maxwell estuvo de nuevo a punto de morir a causa de un golpe con una rama mientras montaba a caballo y la herida subsiguiente se infectó. Por suerte, tras un mes de cuidados de Katherine, James se recuperó por completo. Ese mismo año dimitía de su puesto de profesor en el King's College, abandonaba Londres y regresaba a su Escocia natal.

Los siguientes seis años vivió en Glenlair, trabajando en su teoría de la electricidad y ocasionalmente viajando a Londres y Cambridge, al tiempo que se ocupaba de los asuntos de su vecindad, como conseguir un sueldo digno para el párroco del pueblo de Corsock o manteniendo con su propio dinero la escuela de la cercana Merkland, que el consejo escolar del distrito quería cerrar. También cumplió los deseos de su padre de construir una hacienda apropiada que por culpa de la escasez de fondos no pudo finalizar:

> [Mi padre] quiso construir su casa a la escala apropiada, la que creía que necesitaría en calidad de juez del distrito, de modo que cuando le llegó la muerte solamente había construido una pequeña parte de la misma. Nosotros la completamos después en la medida de lo posible y siempre de acuerdo con sus ideas.

Su vida en Glenlair no fue un retiro. Allí publicó el libro *The Theory of Heat*, dieciséis artículos científicos y empezó a preparar

su famoso *A Treatise on Electricity and Magnetism*. La literatura estuvo entre sus entretenimientos, leyendo en voz alta para su mujer las obras de Chaucer, Milton y Shakespeare, al igual que una gran cantidad de tratados teológicos y filosóficos que le ayudaban a fortalecer su fe.

En el verano 1867, los Maxwell prepararon las maletas para hacer un largo viaje por Italia. Una gran aventura que no empezó como habían previsto: a su llegada a Marsella, el barco fue puesto en cuarentena y James dedicó sus esfuerzos a repartir el agua entre los pasajeros y a animar a quien lo necesitara. Ya en Florencia se encontraron con su amigo Lewis Campbell, que era un entusiasta de la música y la arquitectura italianas. James no les profesaba tanta reverencia: a la orquesta vaticana la bautizó como «la banda del Papa». Eso sí, aprendió suficiente italiano como para poder discutir cuestiones científicas con un colega de Pisa.

En Glenlair transcurrían sus vidas, pero no se encerraban en ella: solían acudir a las citas que la British Association for the Advancement of Science convocaba en diferentes lugares del país, pasaban bastantes semanas en Londres y hacían su visita anual a Cambridge: la universidad le había pedido que fuera moderador y luego examinador del Mathematical Tripos. En 1868, su mentor Forbes dejaba vacante su plaza de rector de la Universidad St. Andrews, la más antigua de Escocia, y le invitaron a que la solicitara; Maxwell declinó la oferta para ocupar un puesto para el que creía que no estaba preparado: «lo mío es el trabajo no el gobierno». Curiosamente, esa misma universidad había rechazado para la plaza de profesor de Filosofía Natural a James P. Joule, el físico que demostró la equivalencia entre trabajo y calor. A juicio de un miembro del tribunal, la pequeña deformidad espinal que sufría lo inhabilitaba para el puesto.

En 1871, la Universidad de Cambridge escribió a Maxwell ofreciéndole una plaza de física experimental. El duque de Devonshire había donado una gran suma de dinero para la construcción de un laboratorio de investigación, y si aceptaba tendría la obligación de ponerlo en funcionamiento.

El consejo rector de Cambridge era consciente de la importancia de contratar a un excelente científico experimental. La

elección primera y más obvia había sido William Thomson, el científico más renombrado de entonces. Sin embargo, él no quería abandonar su amada Universidad de Glasgow, donde a lo largo de varios años había ido creando un excelente centro de investigación que comenzó como un sencillo laboratorio en una antigua bodega. Entre 1870 y 1872, el Tesoro Público concedió 120 000 libras para la construcción de una nueva universidad en Glasgow, donde el laboratorio de física de Thomson ocupaba un lugar honorífico:

> Las grandes ventajas que tengo aquí, en la nueva facultad, dado que cuento con los aparatos y los ayudantes idóneos, así como la gran comodidad de Glasgow para llevar a cabo trabajos mecánicos, consiste en que me ofrece medios que no tendría en ningún otro lugar.

El siguiente en la lista del consejo era el alemán Hermann von Helmholtz. Thomson le escribió cantando las excelencias del futuro centro, pero le habían ofrecido un excelente puesto en Berlín y tampoco aceptó. Maxwell era el tercero en la lista. Seguramente le veían como un científico brillante, aunque algo excéntrico: debía serlo para poder formular semejante teoría electromagnética. Sabían que era un hábil experimentador y había hecho demostraciones con los alumnos, pero no tenía experiencia directa a la hora de dirigir un laboratorio de investigación. James dudó durante un tiempo y al final aceptó. Ahora bien, si después de un año veía que no podía con el trabajo, lo dejaría. En marzo de 1871 fue confirmado oficialmente en su puesto y, una vez más, empaquetó sus cosas. Esta vez para regresar a su Cambridge de juventud.

LA INUTILIDAD DE LOS LABORATORIOS

La creación de un centro dedicado a la experimentación en la muy ilustre ciudad de Cambridge tuvo que sortear la oposición feroz de la élite intelectual de la universidad. Entre ellos se encontraban un antiguo vicerrector, Edward Perowne, y un importante matemático, Isaac Todhunter, que consideraban que «la presencia moral

y física del aprendizaje experimental subvertiría el orden establecido de la excelencia matemática y la sumisión del clérigo y el oficinista». A su modo de ver, las matemáticas y el anglicanismo se absorbían mejor en las clases y capillas que en el laboratorio. El mismo Todhunter sostenía en 1873 que las ciencias experimentales eran «mercenarias» y que, a pesar de que «el trato constante con algún profesor ilustre por su capacidad original para la experimentación» pudiera merecer la pena, las pruebas en las ciencias experimentales no servían para nada. Muchos sacaban a pasear la opinión de William Whewell, el que fuera rector del Trinity cuando Maxwell estudiaba allí, cuando afirmaba que la física «no debía ser de la incumbencia de los *college*». Ese mismo 1873, un año antes de que abriera sus puertas el laboratorio, el venerable *college* Corpus Christi denunció que las futuras instalaciones en la otra acera de Free School Lane violaría sus derechos de «antigua luminaria del saber», y reclamó 600 libras como compensación. No tuvo éxito en su denuncia, pues al poco recibió la orden de desestimar toda posible demanda.

El dinero era fundamental y la universidad había conseguido solamente un 30% de la cantidad necesaria. Fue entonces cuando entró en juego el rector William Cavendish (1808-1891), séptimo duque de Devonshire, ganador del Smith's Prize y del Second Wrangler, que se ofreció a correr con los gastos pertinentes. Así estaba la situación cuando Maxwell llegó. Stokes, profesor lucasiano de matemáticas, le dijo que «el principal deber del nuevo catedrático será, en primer lugar, asesorarnos sobre la construcción del laboratorio de física y museo propuestos». Resulta llamativo que las ciencias universitarias del período victoriano fueran notablemente partidarias de los museos: «el despliegue razonado de colecciones de especímenes y maquetas era tan predominante en ingeniería y ciencias físicas como en botánica o anatomía», afirma el historiador de la ciencia Simon Schaffer. De hecho, muchas de las iniciativas de la ciencia de mediados del siglo XIX giraban en torno a los museos.

Maxwell se puso manos a la obra. Junto con el físico y vicedecano del Trinity, Coutts Trotter, se impuso la tarea de visitar cuantos edificios y laboratorios fueran necesarios. En abril de

1871 viajó a Edimburgo y a Glasgow para discutir los planes que tenía para Cambridge. En la primera se citó con su amigo Peter Guthrie Tait, quien se avergonzó del «pobre apaño» que él mismo había llevado a cabo en su universidad. Maxwell, que tenía ya sus propias ideas, le explicó cada detalle, como que iba a ser necesario evitar las paredes alisadas y asegurarse de que había madera suficiente para sostener los aparatos atornillados a ellas: tenía en mente ciertos programas experimentales y el edificio debía estar construido en consonancia. La reunión más enjundiosa la tuvo con Thomson, que poseía el mejor laboratorio de todo el Reino Unido. Discutieron largo y tendido cada detalle, por nimio que pareciera.

A finales de marzo, Maxwell trazó un boceto de sus planos en una postal que envió a Thomson: por entonces quería tres salas con aparatos electromagnéticos y gravimétricos de precisión, un despacho privado para los catedráticos, una sala de preparación en la parte posterior de un gran auditorio en el primer piso y espacio para los ensayos con calor y las pruebas ópticas en las buhardillas de la planta alta. Trotter le advirtió del riesgo que se corría si la universidad contrataba un arquitecto de renombre. Maxwell coincidió en su apreciación:

> Espero que no sea una figura de Londres [...] Por lo que veo, no hay nadie que tenga la más remota idea de lo que hace falta en un laboratorio de física, y la única posibilidad de llevar a cabo la construcción de un edificio de veras práctico parece ser la de encontrar a alguien que sea capaz de aceptar consejos sobre la disposición.

Alguien dijo una vez que los arquitectos no construyen edificios, sino monumentos a su nombre, y Maxwell quería evitar este extremo. El arquitecto elegido fue alguien de la zona y que hasta entonces el único encargo que había recibido de Cambridge era la dirección de ciertas reformas del St. Catherine's College en 1868: William Fawcett. En noviembre de 1871, Fawcett entregó a Maxwell un plano del edificio que seguía bastante de cerca los bosquejos y planos del físico. Mientras, los críticos seguían en su línea; la revista científica *Nature*, que se había fundado en 1869, dudaba de que pudiera llegar a la excelencia en la investigación:

con suerte, decía, en diez años alcanzaría la calidad de una universidad alemana de provincias.

El laboratorio se construyó entre la primavera de 1872 y el otoño de 1873. Justo ese año aparecía la gran obra de Maxwell, los dos volúmenes de *A Treatise on Electricity and Magnetism*, cuya importancia se encuentra a la altura de los *Principia mathematica* de Isaac Newton. En unas mil páginas, Maxwell realiza una soberbia síntesis de todo lo que se sabía hasta la fecha sobre el electromagnetismo y expone su particular enfoque, que se con-

CAVENDISH, EL SOLITARIO OBSESIVO



Nacido en Niza, hijo de un lord inglés, Henry Cavendish (1731-1810) estudió en la Universidad de Cambridge, pero la abandonó antes de acabar sus estudios por su completa falta de interés hacia las formalidades convencionales. Cavendish tenía un carácter excéntrico y despistado. Vivió toda su vida como un recluso: detestaba la compañía de otros hombres y le aterrorizaba la de las mujeres, hasta tal punto que tenía prohibido a sus sirvientas cruzarse con él por los pasillos. Únicamente se comunicaba con ellas mediante notas escritas. A un personaje tan huraño e introvertido sólo le quedan dos salidas: el suicidio o la obsesión compulsiva. A Cavendish le salvó su obsesión por la ciencia, por experimentar. Su devoción era tal que en sus experimentos sobre la electricidad medía la intensidad de la corriente por la gravedad de las descargas que sufría; se usaba a sí mismo como amperímetro.

Todo por la ciencia

Además de sus trabajos sobre la electricidad, Cavendish fue el primero en descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno. Acorde a su personalidad, no le importaba en absoluto la fama y apenas se preocupaba por que el resto de los científicos conocieran el resultado de sus investigaciones. Vivía por y para la ciencia en total soledad, esa misma soledad que había asumido como opción de vida. Incluso cuando su salud se quebró, exigió morir como había vivido, solo. Cavendish, de quien se pudieron conocer sus trabajos gracias a los

vertiría en un ejemplo de lo que se conoce como la teoría clásica de campos.

En él realizó otra predicción sorprendente: que la luz ejerce una presión sobre el entorno. Según sus cálculos, la luz solar empuja la superficie de la Tierra con una fuerza de 7 gramos por hectárea. Comprobada en 1900 por el físico ruso Pyotr Lebedev (1866-1912), ayuda a explicar por qué se sostiene la estructura de una estrella y no colapsa por acción de la gravedad, o por qué la cola de los cometas apunta siempre en dirección contraria al Sol.

apuntes que dejó, ha pasado a la historia por realizar uno de los experimentos más delicados y concienzudos de la física: medir el valor de la constante de la gravitación universal. Lo hizo cuando tenía cerca de setenta años. Henry quería medir la atracción gravitatoria directa entre dos cuerpos. Para ello suspendió de un hilo una barra de hierro, en cuyos extremos colgó sendas bolitas de plomo. Entonces aproximó dos bolas más grandes, también de plomo, a las dos pequeñas. La forma de hacerlo no fue alineándolas, sino bajo un cierto ángulo que provocase la torsión del hilo que sostenía la barra. Midiendo esta sutil y casi imperceptible torsión, pudo deducir el valor de la fuerza gravitatoria con que se atraían y a partir de ella pudo calcular, por primera vez en la historia, la masa y la densidad de la Tierra.

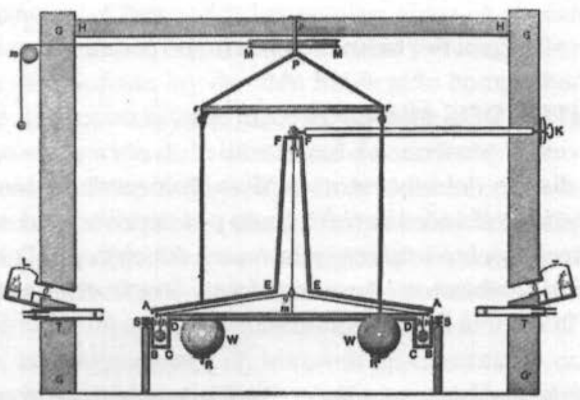


Ilustración del aparato diseñado por Henry Cavendish para medir la constante de la gravitación universal.

El edificio que iba a ser el buque insignia de la física experimental de Cambridge se inauguró con una sonada ceremonia universitaria en junio de 1874. Iba a denominarse laboratorio Devonshire, pero a sugerencia de Maxwell se le mudó el nombre a Cavendish, no solo en honor del duque, sino también por uno de sus antepasados, un excelente físico experimental llamado Henry Cavendish. Ese año, el duque le entregó a James los manuscritos no publicados que contenían los experimentos sobre electricidad realizados por su familiar entre 1771 y 1781, sugiriéndole que podía prepararlos para su publicación. Tras leerlos, Maxwell quedó impresionado por la elegancia, la originalidad y la brillantez de su trabajo. No solo había diseñado los más cuidadosos experimentos que había visto nunca, sino que era el descubridor de muchos fenómenos que hasta entonces se habían atribuido a otros. Por ejemplo, descubrió la ley de Ohm, que relaciona la intensidad de corriente con el voltaje y la resistencia, medio siglo antes que el alemán Georg Simon Ohm. James sintió en lo más profundo que la historia de la ciencia no podía obviar este hecho y los años siguientes dedicó gran parte de su tiempo a preparar la edición del ímprobo trabajo de este impresionante científico experimental de carácter más que peculiar. El libro fue publicado en 1879, pocas semanas antes de la muerte de Maxwell.

ENTRE DOS MUNDOS

El diseño del laboratorio Cavendish revelaba las tensiones que existían entonces entre el gusto por la privacidad, algo tradicional entre los catedráticos, y la nueva función pública de su trabajo como profesores e investigadores. Según comenta el historiador de la ciencia Simon Schaffer:

> La puerta de entrada era gótica, como debía ser, y estaba provista de puertas de roble en las que estaban grabados el oportuno salmo y el escudo de armas de la familia Cavendish, además de ostentar una estatua del propio duque de Devonshire sosteniendo una maqueta de

laboratorio. La división del trabajo y las marcas de prestigio quedaban claras. La portería y el laboratorio del profesorado, en la primera planta, eran debidamente distinguidos. El aula de magnetismo ocupaba el extremo oriental de la planta baja, un lugar de honor, con estantes de base sólida y un espacio relativamente amplio para el equipo auxiliar.

Maxwell cedió sus instrumentos y diseñó otros tantos. En los primeros años era tradicional que los recién llegados empezaran a trabajar en el magnetómetro de Kew porque «permitía realizar prácticas no solo en la lectura de escalas y en la realización de ajustes, sino también en las observaciones temporales, contando el tictac de un reloj mientras se observaba el imán vibrante». Evidentemente, los recursos más amplios se destinaron a las nuevas materias que habían sido incluidas en el Tripos: calor y magnetismo en la planta baja y electricidad en una gran sala abuhardillada.

«El libro no es un atlas, sino el informe de un explorador.»

— Comentario del ingeniero eléctrico Basil Mahon sobre la obra de Maxwell *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873).

El programa de investigación estaba claro con el diseño de Maxwell. Uno de los temas que más le preocupaba era la medición precisa de las constantes físicas fundamentales, algo que necesitaban imperiosamente campos como la electricidad y el magnetismo. Por ejemplo, la mencionada ley de Ohm había sido comprobada, pero no se sabía si la resistencia de un trozo de cable era una cantidad fija o variaba en función de la intensidad de corriente, como se sabía que hacía con la temperatura. Definir de manera correcta la unidad de resistencia eléctrica, el ohmio, fue uno de los principales objetivos del Cavendish. No era para menos, pues el desarrollo de la telegrafía dependía fuertemente de tener bien definidas tanto las unidades como las leyes en las que se basaban.

En esencia, las obligaciones de Maxwell en Cambridge eran dos: enseñar electricidad, magnetismo y calor para el Mathematical Tripos y diseñar y dirigir las líneas de investigación del laboratorio. Su objetivo era atraer a los estudiantes de matemáticas hacia la física experimental.

A los jóvenes estudiantes que entraban en el laboratorio les dejaba investigar lo que quisieran. Era la norma que él había seguido durante su vida; nunca sugirió ningún tema a no ser que se lo preguntaran. Su trabajo como director y su valía humana hicieron que se ganara el aprecio de cuantos le conocieron tanto dentro como fuera del laboratorio; si como profesor no fue especialmente brillante debido a su dificultad para hablar en público, como guía en el mundo de la ciencia experimental fue un importante puntal de apoyo.

Por supuesto, cometió sus errores. Uno de ellos, y principal, fue suponer que la pasión que él tenía por el conocimiento estaba presente en todos los que trabajaban con él. Arthur Schuster (1851-1934), un físico que hizo importantes trabajos en espectroscopia y que conocía de primera mano la forma de trabajar tanto en Cambridge como en Berlín, comentó los problemas que él creía que tenía el Cavendish a quien fue escogido como director tras la muerte de Maxwell, John William Strutt, tercer barón de Rayleigh: no había posibilidad de realizar experimentos de primera fila que fueran simultáneos y de signo contrario, el trabajo de aula no estaba relacionado con el que se llevaba a cabo en el laboratorio, no existía una supervisión del trabajo del alumnado y, sobre todo:

> [...] incluso un hombre bueno es un ser completamente indefenso la primera vez que entra en un laboratorio. No tiene ni idea del tiempo que lleva concebir y poner a punto los detalles para la experimentación, ni cómo las dificultades imprevistas con frecuencia pueden postergar la investigación principal hasta casi eclipsarla.

Lo que señalaba con acierto Schuster era que existía una diferencia sustancial entre el trabajo en un laboratorio privado y el de un centro dedicado por completo a la investigación. El problema es que Maxwell había hecho prácticamente todas sus investigaciones en lugares como el primero: en su taller en Glenlair y en el laboratorio de Forbes en Edimburgo aprendió las técnicas necesarias; sus experimentos cruciales de electromagnetismo, color y viscosidad de los gases los hizo en el taller de ingeniería de los sótanos del King's College, en su desván de Kensington y en los que habían montado en sus casas los expertos en electromagnetismo en Londres...

ENFERMEDAD Y MUERTE

El matrimonio Maxwell vivía cómodamente instalado en Scroope Terrace. Cualquiera que conociera a James y visitara su casa se percataría de que en su interior faltaba algo que siempre había estado presente: un laboratorio. No lo necesitaba.

Al poco tiempo de llegar, la salud de Katherine empeoró y James dedicó gran parte de su tiempo a cuidarla. Muy poco se sabe de su carácter, aunque la idea más extendida es que se trataba de una mujer «difícil». Su prima, Jemima Blackburn, la tildó de «ni bonita, ni sana, ni agradable» y de «naturaleza suspicaz y celosa». Algunos autores ponen en duda que estas palabras reflejen realmente una opinión objetiva de Jemima, pero de lo que no hay duda es que el matrimonio sentía devoción el uno por el otro y James siempre puso el bienestar de su mujer por delante del suyo propio.

Su nueva situación como director del Cavendish no hizo que abandonara Glenlair; pasaban cuatro meses al año en sus tierras, donde disfrutaba de la vida del campo que tanto le gustaba. Maxwell se encontraba en la cima de la madurez, tanto humana como intelectual. Aunque pronto las cosas iban a empeorar.

En la primavera de 1877 empezó a sufrir de acidez de estómago crónica. El bicarbonato sódico aliviaba los síntomas y durante el año y medio siguiente continuó con su labor habitual: dirigir el Cavendish, dar sus clases y escribir artículos y libros, entre otros una pequeña joya titulada «Matter and Motion», que resulta ser una excelente introducción a la mecánica donde, con el uso de un mínimo de matemáticas, explica los conceptos y leyes de esta disciplina de la física.

Como de costumbre, en junio el matrimonio regresó a Glenlair; en septiembre, James empezó a tener fuertes dolores. Estaba previsto que acudiera de visita uno de los primeros científicos que contrató, William Garnett, que le había impresionado con sus respuestas en el Tripos. Su mujer le dijo que podían escribirle para cancelarla, pero él se negó. Cuando el matrimonio Garnett llegó, se encontraron con un Maxwell muy desmejorado, pero aún con fuerzas para dirigir el rezo vespertino o cuidar con mimo a sus invitados.

Maxwell recordó la enfermedad de su madre y empezó a sospechar que le estuviera pasando lo mismo. El 2 de octubre le diagnosticaron que sufría un cáncer abdominal y que le quedaba, a lo sumo, un mes de vida. Le recomendaron regresar a Cambridge, donde el doctor Paget le podría administrar medicamentos que hicieran más llevadero el dolor. El 8 de octubre llegó a estar tan débil que casi no pudo andar desde el vagón al carruaje. Su médico en Glenlair, el doctor Lorraine, escribió a Paget un informe en el que, además de explicarle la situación, añadió:

> Debo decir que es uno de los mejores hombres que he conocido, y además del gran mérito que tienen sus logros científicos es un ser que, hasta donde puede discernir el juicio humano, es el ejemplo más perfecto de un caballero cristiano.

James Clerk Maxwell murió el 5 de noviembre de 1879. El funeral se celebró al domingo siguiente en St. Mary's Church, y tras una ceremonia en la capilla del Trinity College fue llevado a Glenlair para ser enterrado en el cementerio de la parroquia de Parton, junto a su padre y a su madre. Su mujer Katherine murió siete años más tarde.

La biblioteca personal de Maxwell fue cedida al laboratorio Cavendish junto con 6000 libras para la creación de una *fellowship* de física. Su mansión en Glenlair sufrió dos incendios devastadores, uno en 1899 y otro en 1929, que la destruyeron completamente. En 1993, la parte más antigua fue reconstruida por el nuevo propietario. Aún hoy, desde un camino que sale de la carretera que une Dalbeattie con Corsock, pueden verse las chimeneas y los gabletes de la casa que un día cobijara a una de las mentes más portentosas del siglo XIX.

Lecturas recomendadas

ASIMOV, I., *Introducción a la ciencia I. Ciencias físicas*, Barcelona, Plaza & Janés, 1973.

ATKINS, P.W., *La segunda ley*, Barcelona, Prensa Científica, 1992.

BERNAL, J.D., *Historia social de la ciencia, volumen II*, Madrid, Ediciones Península, 1976 (cuarta edición).

BODANIS, D., *El universo eléctrico*, Barcelona, Planeta, 2006.

BURKE, J., *The Pinball Effect*, Londres, Little, Brown and Co., 1996.

BUTTERFIELD, H., *Los orígenes de la ciencia moderna*, Madrid, Taurus, 1982.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

PULLMAN, B., *The Atom in the History of Human Thought*, Oxford, Oxford University Press, 1998.

SMORODINSKY, Y., *La temperatura*, Moscú, Editorial Mir, 1983.

SPIELBERG, N. Y ANDERSON, B.D., *Siete ideas que modificaron el mundo*, Madrid, Ediciones Pirámide, 1990.

THUILLIER, P., *De Arquímedes a Einstein. Las caras ocultas de la investigación científica (II)*, Madrid, Alianza, 1990.

Índice